

DT  
446  
8823  
100  
225295

國立勤益科技大學  
機械工程系碩士在職專班  
碩士論文

用於低壓直流應用之新型電磁電斷路器的研發

Development of a Novel Electromagnetic Circuit Breaker for DC Low  
Voltage Application



指導教授：潘吉祥教授

研究生：簡仲逸

國立勤益科技大學圖書館



225295

中華民國 一 百 年 六 月

用於低壓直流應用之新型電磁電斷路器的研發

Development of a Novel Electromagnetic Circuit Breaker for DC Low  
Voltage Application

指導教授：潘吉祥教授

研究生：簡仲逸

國立勤益科技大學

機械工程系碩士在職專班

碩士論文

A Thesis Submitted to  
Department of Mechanical Engineering  
National Chin-Yi University of Technology  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering

June 2011

Taiping, Taichung, Taiwan, Republic of China

中華民國 一 百 年 六 月

# 國立勤益科技大學

## 博碩士論文全文上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之論文為授權人在國立勤益科技大學  
機械工程系\_\_\_\_\_組 99 學年度第 2 學期取得碩士學位之  
論文。

論文題目：用於低壓直流應用之新型電磁電斷路器的研發  
指導教授：潘吉祥

### ■ 同意

本人具有著作權之論文全文資料，非專屬、無償授予本人畢業學校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或數位化等各種方式重製與利用，提供讀者基於著作權法合理使用範圍內之線上檢索、閱覽、下載及列印。

論文全文上載網路公開之範圍及時間：

校內區域網路	■ 中華民國 101 年 8 月 9 日公開
校外網際網路	■ 中華民國 101 年 8 月 9 日公開

授權人：簡仲逸

簽名：簡仲逸

中華民國 100 年 8 月 9 日

# 國家圖書館

## 博碩士論文電子檔案上網授權書

本授權書所授權之論文為授權人在國立勤益科技大學機械工程系 99 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文題目：用於低壓直流應用之新型電磁電斷路器的研發  
指導教授：潘吉祥

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文（含摘要），非專屬、無償授權國家圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

上列論文為授權人向經濟部智慧財產局申請專利之附件或相關文件之一（專利申請案號：\_\_\_\_\_），請於 \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日後再將上列論文公開或上載網路。

因上列論文尚未正式對外發表，請於 10 年 8 月 9 日後再將上列論文公開或上載網路。

授權人：簡仲逸

親筆簽名及蓋章： 簡仲逸  民國 100 年 8 月 9 日

電話：04-25291013 傳真：

聯絡地址：台中市豐原區西勢路114巷42弄18號

E-Mail：aexaaexz@yahoo.com.tw

國立勤益科技大學  
研究所碩士在職專班  
論文指導教授推薦書

本校\_\_\_\_\_機械工程系\_\_\_\_\_研究所\_\_\_\_\_簡仲逸\_\_\_\_\_君

所提論文\_\_\_\_\_用於低壓直流應用之新型電磁電斷路器的研發\_\_\_\_\_

---

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授

潘志輝

100年8月10日

國立勤益科技大學  
研究所碩士在職專班  
論文口試委員會審定書

本校 機械工程系 碩士班 簡仲逸 君

所提論文 用於低壓直流應用之新型電磁電斷路器的研發

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

口試委員：

潘吉祥

張厚銘

劉嘉

指導教授：

潘吉祥

系（所）主管：

機械工程系
主任 蔡明義

中華民國 100 年 7 月

## 誌謝

此篇論文可以順利的完成，首先我要感謝我的指導教授潘吉祥博士。潘吉祥老師平時與學生互動非常的頻繁，對於學生的想法總是非常的尊重，總是在旁於以協助並以自身的經驗來給學生建議。在我讀研究所的這一段期間裡，老師總是很照顧我這個白天在職的學生，相處就像朋友一樣，能夠完成這一份學業，我衷心的感謝老師對我的指導與幫忙。

其次要感謝論文的口試委員 張源銘博士、劉晉嘉博士，於百忙之中不吝嗇地撥空對學生之論文給予諸多指教與建議。

再來便要謝謝在學業中一起成長的昀庭、建國和凱翔同學，在這兩年裡多虧了你們的協助和努力。即使在研究上遇到瓶頸，你們也能提供許多意見讓我也不同的思考方向來突破。在畢業之後即使分處各地，也希望你們能一切順利，再次的謝謝你們。

接下來要謝謝的是我的家人，對於我讀研究所的事全力支持，讓我沒有後顧之憂地完成研究所的學業，真的非常感謝你們。

# 用於低壓直流應用之新型電磁電斷路器的研發

學生：簡仲逸

指導教授：潘吉祥教授

國立勤益科技大學機械工程系碩士在職專班

## 摘要

本文研發一種在所預定低壓直流安全電流範圍值內作動，一種具有雙穩態結構的新型電磁電斷路器。斷路器的內部構造簡潔並且容易微型化。它主要是由電磁鐵、一個永久磁鐵和雙穩態結構所構成。這種電磁電斷路器具有創造性的設計，只要改變電磁鐵或雙穩態機構作動原件的設計參數，就可以設計一系列的斷路器，用於不同的安全電流值下致動操作。本文電磁電斷路器可以允許短暫電流爆衝（surge），仍然可以保持電路的正常運作。該電磁電斷路器可以自動並且可以在不需要冷卻時間毫不延遲下恢復電路供電。周遭環境的溫度也不會影響到斷路器的安全的運作。

**關鍵字：**電磁鐵、雙穩態結構、斷路器



# Development of a Novel Electromagnetic Circuit Breaker for DC Low Voltage Application

Student : Jung Yi Jang.

Advisors : Dr.Chi Hsiang PAN

Department of Mechanical Engineering  
National Chin-Yi Institute of Technology

## ABSTRACT

This paper presents a novel electromagnetic circuit breaker to function at a predetermined current threshold by using a bistable structure. The construction of the circuit breaker is compact and can be miniaturized easily. It mainly consists of solenoids, contact latches with a permanent magnetic core, and a bistable structure. With creative design of the contact latches, the breaker permits brief current surges beyond normal running current. By altering the design parameters of the solenoid or bistable structure or contact latch, an array of circuit breakers are available to detect a variety of current thresholds. The circuitbreaker can be reset automatically and immediately to restore power without delay. Ambient temperature does not affect the current threshold of the magnetic breaker and require no cooling period after a power surge or short circuit.

**Keywords** : Electromagnet 、 Bistable Structure 、 Circuit Breaker

# 目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	v
圖目錄	vi
符號說明	vii
一、緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機與目的	1
1.3 文獻回顧	2
1.4 研究方法與流程	6
1.5 論文架構	7
二、電磁式電斷路器相關原理	8
2.1 電磁式電斷路器的原理	8
2.2 電磁鐵的原理	11
2.2.1 電磁鐵的磁力方向	12
2.2.2 電磁鐵的特性	13
2.2.3 馬克士威方程組	14
2.2.4 磁場的原理	15
2.2.5 B場與H場原理介紹	18
2.2.6 磁滯現象介紹	19
2.2.7 磁導率介紹	20
2.2.8 電磁力原理介紹	25
2.2.9 磁場線原理介紹	27
2.3 雙穩態結構(Bistable Structure)原理	28
2.3.1 雙穩態結構說明	28
2.3.2 柔性連結系統	30
2.3.3 雙穩態機制介紹	30
2.4 導電連接元件原理	35
2.4.1 接觸元件說明	35
三、電磁式電斷路器的設計與分析	38
3.1 雙穩態結構設計與分析	38
3.1.1 雙穩態結構非線性分析定義	38

3.1.2 雙穩態結構(Bistable Structure)分析步驟	42
3.2 電磁鐵結構設計與分析	53
3.2.1 ANSYS 電磁場分析	53
3.2.2 電磁場分析步驟	54
四、電磁式電斷路器的製造	63
4.1 電磁式電斷路器主體製造	63
4.1.1 電磁式電斷路器主體材質	63
4.1.2 電磁式電斷路器加工設備	63
4.2 雙穩態結構(Bistable Structure)中心元件製造	64
4.2.1 雙穩態結構(Bistable Structure)中心元件主體材質	64
4.2.2 雙穩態結構(Bistable Structure)中心元件加工設備	65
4.3 電磁鐵製造步驟	67
4.3.1 電磁鐵主體材質	67
4.3.2 電磁鐵加工設備	68
4.4 導電連接元件製造	70
4.4.1 導電連接元件材質	70
4.5 雙穩態機構電磁斷路器	71
五、電磁式電斷路器的實驗	72
5.1 實驗分析項目	72
5.1.1 雙穩態機構(Bistable Structure)推力測試	72
5.1.2 電磁鐵推力測試	75
5.1.3 電磁鐵作動溫度測試	78
5.1.4 間隙影響之測試	81
5.1.5 電磁式電斷路器功能性測試	83
5.1.6 電磁式電斷路器斷復電測試	86
六、結論	88
6.1 結果與討論	88
6.2 未來工作	89
參考文獻	90

## 第一章 緒論

### 1.1 前言

斷路器（英語：Circuit Breaker，簡稱CB），又稱為遮斷器，為一種日常生活普遍常見的過電流保護之安全裝置，可以使用於在室內的配線作業上使用之總電源開關與分電流控制開關（ON/OFF POWER），亦可有效的保護電器用品的重要元件，最重要的功能在於用作電路短路的安全保護和防止電流嚴重超載，而在工業機器上的馬達負載保護，也是會指定使用斷路器做為保護裝置之一。

斷路器主要可分為機械式與固態式開關：機械式斷路器的導通損失低但因為輔助控制慢所需截止的時間長，因此故障電流大，往往需要額定大或是具有消弧功能的斷路器；固態式斷路器則有動作時間快無電弧的優點，但主線路上以串聯的半導體元件當作開關，時間拉長導通損失就大，散熱問題就必須考量。

### 1.2 研究動機與目的

由於全球世界上的資源逐漸的枯竭，因此我們在產品的設計上要盡量節省資源。基於傳統電路斷路器由於體積龐大且構造複雜，因此所需要相關製造成本相對提高，因此針對舊型斷路器，我們嘗試以更簡單的構造原理，花費比舊型的電路斷路器更少的材料資源，降低大量生產成本，來設計出一個低成本電磁式斷路器。雙穩態機構電磁式電斷路器的內部構造簡潔並且容易微型化。它主要是由電磁鐵、一個永久磁鐵和雙穩態結構所構成。這種雙穩態結構電磁式電斷路器具有創造性的設計，只要改變電磁鐵或雙穩態機構作動原件的設計參數，就可以設計一系列的斷路器，用於不同的安全電流值下運作。本文雙穩態結構電磁式電斷路器可以

允許短暫電流爆衝 (surge)，仍然可以保持電路的正常運作。

### 1.3 文獻回顧

世界上最早的斷路器出現于 1885 年，它是一種刀開關和過電流脫扣器的組合。1905 年具有自由脫扣裝置的空氣斷路器誕生。1930 年以來，隨著科技的進步，電弧原理的發現和各種滅弧裝置的發明，逐漸形成了目前的機構。50 年代末，電子元件的興起，又產生了電子脫扣器，到了今天，由於小型化電腦的普及，又有智能型斷路器的問世。

#### 無熔絲開關

目前日常生活中最常使用的就是無熔絲開關，如圖 1-1 所示，其工作溫度必須在攝氏 40°C 以下環境使用，若超過環境溫度 40°C 時開關之過載電流值會降低使開關過載電流無法準確的動作會有不小的誤差存在。它的使用方法為當無熔絲開關把手在 ON 的位置時為通路狀態，在 OFF 的位置時為斷路狀態，在中間位置時為跳脫狀態，無熔絲開關跳脫後只需要將把手先行向下先切至 OFF 的位置接著再向上切至 ON 的位置即可回復電源的供應。

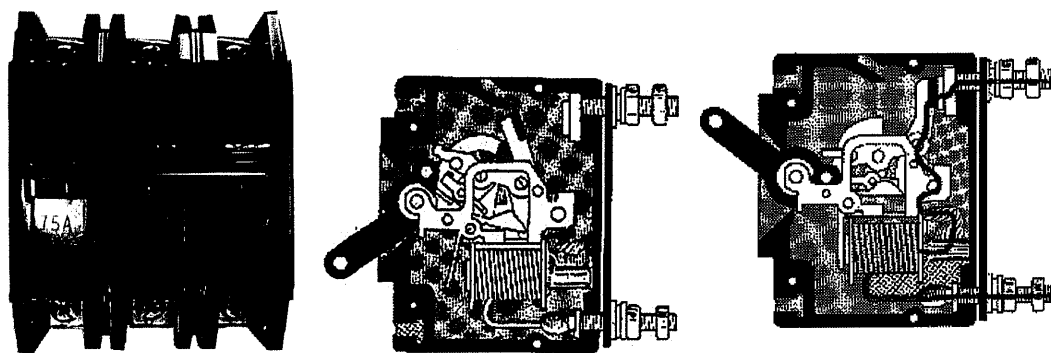


圖 1-1 無熔絲開關示意圖

### 空氣斷路器

空氣斷路器是利用預先貯存的壓縮空氣來當作消除電弧介質。壓縮空氣不僅僅是作為消除電弧和絕緣介質，而且還作為傳動的動力，如圖 1-2 所示。

由於新鮮的壓縮空氣流除了可以帶走弧隙中熱量，降低弧隙溫度，還能直接帶走弧隙中的游離帶電質點，補充新鮮氣體介質，使去游離大大加強，弧隙介質強度迅速恢復，所以，空氣斷路器斷流容量大，滅弧時間短，而且快速自動重合閘時斷流容量不降低。

但是空氣斷路器也是有金屬消耗量大，需要裝設壓縮空氣系統等輔助設備和價格較貴等缺點。通常是用於 110kV 及以上的大容量電力系統中。

目前生產的空氣斷路器多是採用常充氣式，即無論在合閘或分閘狀態，消弧室內部都充滿壓縮空氣，保證了接觸頭間必要的絕緣強度。這種型式結構簡單，空氣壓力利用好，氣耗量少。

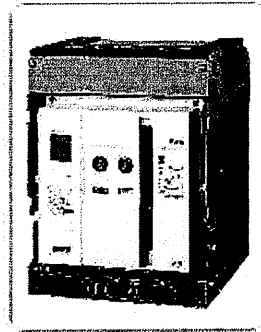


圖 1-2 空氣斷路器圖

### 液壓電磁式斷路器

液壓電磁式斷路器是採用液壓電磁式跳脫器實現短路及過載保護，如圖 1-3(a)所示，當過電流通時，矽油管內藏的鐵心則是會緩慢的位移，當鐵心移動到可動鐵片附近時電磁力會將可動鐵片吸引，使可動鐵片產生位移，運用此位移推動設備用斷路器的跳脫裝置使其跳脫，來達到切開電路的功能，如圖 1-3(b)所示。當短路電流等大電流通時，如圖 1-3(c)所示，電磁力大之故，會直接的吸引可動鐵片，可動鐵片產生位移，運用此位移推動設備用斷路器的跳脫裝置使跳脫，以達到切開電路的功能。

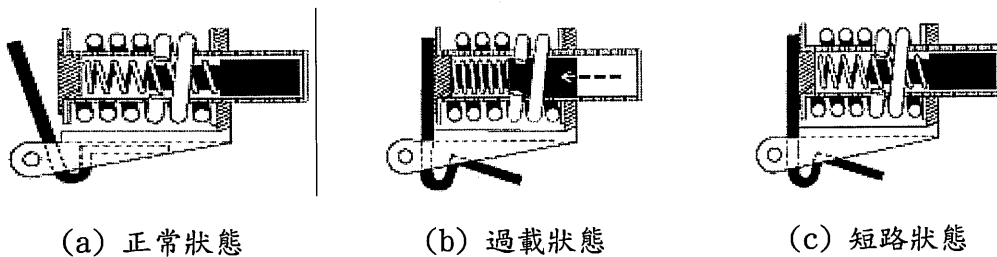


圖 1-3 液壓電磁式斷路器作動原理圖

## 磁吹斷路器

利用磁場作用使電弧熄滅的一種斷路器。磁場通常由分斷電流本身產生，電弧被磁場吹入滅弧片狹縫內，並使之拉長、冷卻，直至最終熄滅。磁吹斷路器的觸頭在空氣中閉合和斷開，如圖 1-4 所示。

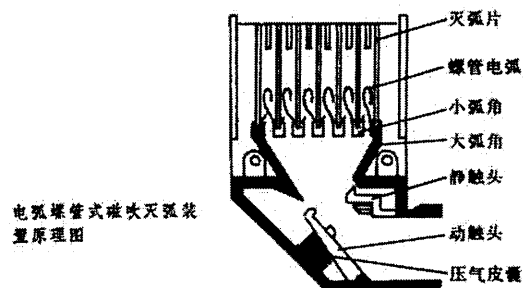


圖 1-4 磁吹斷路器說明圖

資料來源: 互動百科

## 熱力電磁式斷路器

熱力電磁式斷路器由雙金屬和電磁鐵組成，如圖 1-5 所示。雙金屬開關用來控制過載電流，位於跳閘桿後面，屬於載流線路的一部分，當電流超過斷路器額定值時，使他向跳閘桿彎曲，造成跳閘桿轉動斷開電路。斷路器的磁鐵部分是一個帶有線圈的鐵心，成為一個電磁鐵。當短路電流通過電磁鐵線圈時，電磁鐵會產生足夠的磁場強度來吸引附近的銜鐵。當銜鐵的頂部像電磁鐵移動時，銜鐵轉動跳閘桿，斷路器跳閘，電流則被切斷使電磁鐵線圈斷路。



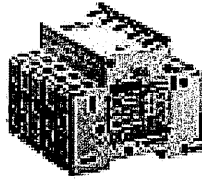


圖 1-5 熱力電磁式斷路器圖

資料來源:淳碩科技公司

#### 1.4 研究方法與流程

本研究為了改善傳統斷路器體積龐大、組裝費時以及製造成本高昂。針對這些傳統的斷路器缺點，我們嘗試以最低的成本並且微型化簡單為我們的設計重點，來進行開發設計出一種體積微小、組裝快速以及低成本和具有雙穩態機構的電磁式電斷路器。本篇論文首先先以雙穩態結構電磁式電斷路器所包含的主要各部分元件，有雙穩態結構、電磁鐵、中心永久磁鐵元件、導電連接元件和斷路器主體進行設計與分析。

藉由 ANSYS 分析之後，便實際的測量實驗數據與分析結果相比較檢討，來達到我們理想的作動數值。

## 1.5 論文架構

本論文總共分成五章，內容是以雙穩態結構電磁式電斷路器的設計與分析，其本篇論文綱要內容列述如下：

第一章 介紹本論文之研究背景與目的、文獻探討、研究方法與流程、各章節之概要與內容。

第二章 電磁式電斷路器相關原理介紹

第三章 電磁式電斷路器的設計與分析

第四章 說明電磁式電斷路器的製造方法與步驟

第五章 針對本論文所提的實驗與分析方法實際進行實驗與分析。

第六章 對於本篇論文之實驗成果做一結果與討論，並說明本研究之貢獻與未來工作。



## 第二章 電磁式電斷路器相關原理

### 2.1 電磁式電斷路器的原理

斷路器的內部構造簡潔並且容易微型化。它主要是由電磁鐵、一個永久磁鐵和雙穩態結構所構成，如圖 2-1、2-2、2-3 所示，。這種電磁式電斷路器具有創造性的設計，只要改變電磁鐵或雙穩態機構作動原件的設計參數，就可以設計一系列的斷路器，用於不同的安全電流值下運作。本文電磁式電斷路器可以允許短暫電流爆衝（surge），仍然可以保持電路的正常運作。而我們所設計出來的電磁式電斷路器具有以下優點：

1. 構造簡單
2. 大量生產
3. 生產成本便宜
4. 微型化簡單
5. 不受外在溫度所影響其功能性
6. 有效防止短暫電流暴衝

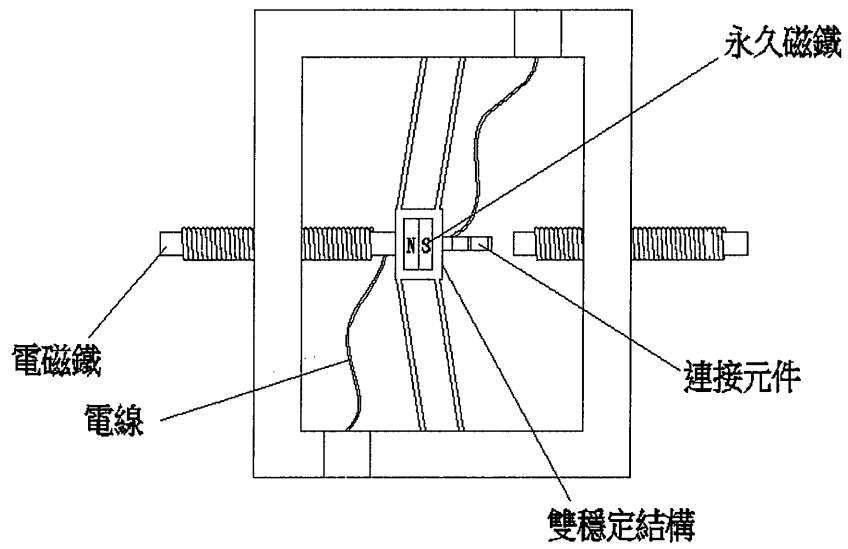


圖 2-1 電磁式電斷路器示意圖

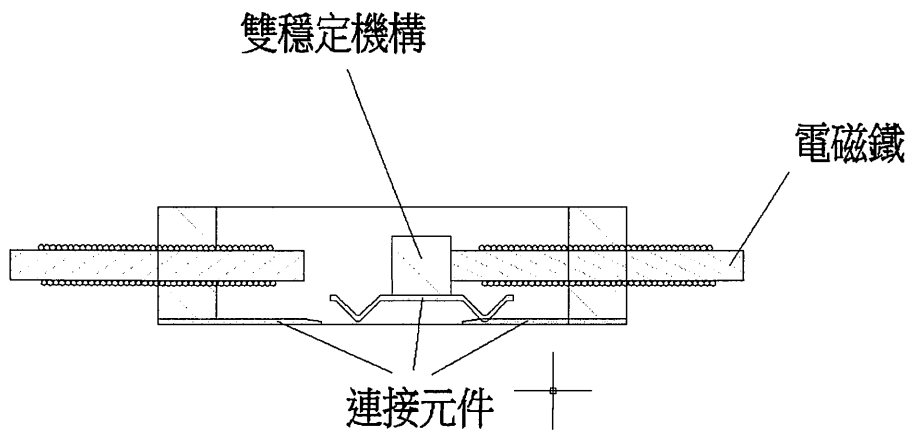


圖 2-2 電磁式電斷路器剖面圖

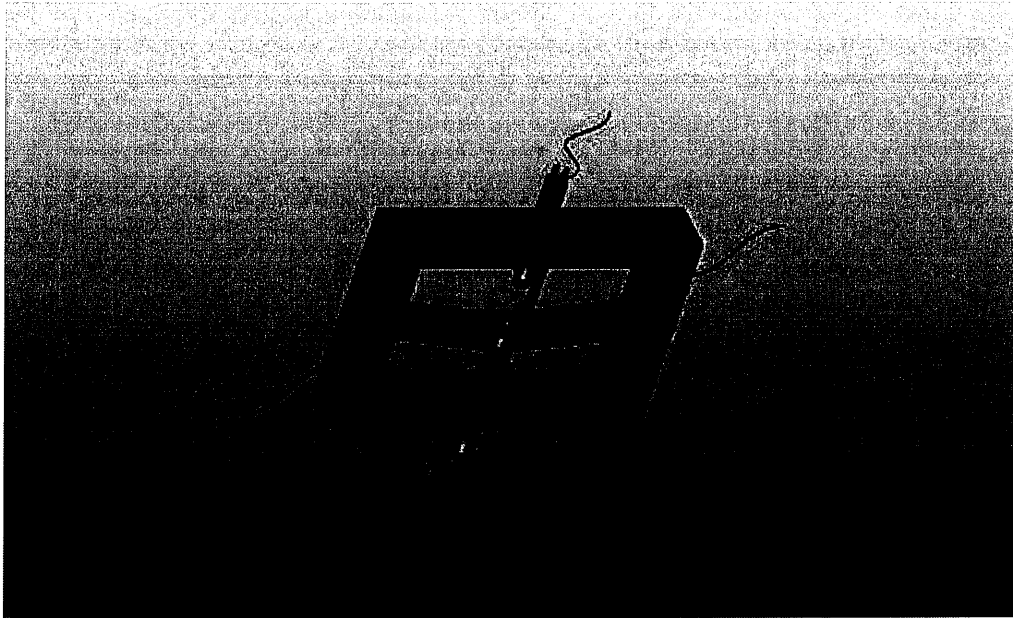


圖 2-3 電磁式電斷路器 3D 圖

電磁式電斷路器是用電磁鐵所產生電磁力與內含有永久磁力的作動元件，藉由電磁鐵的電磁力與雙穩態結構的反作用力來判定電路是否處於安全狀態。

電磁式電斷路器的開關是藉由一個內部有永久磁鐵的作動原件再加上一個懸浮狀態下的雙穩態機構來切斷電流，如圖 2-4 所示。

當電流增大時，電磁鐵所產生電磁力也同樣的增大。當電磁鐵的電流超過電磁式電斷路器的安全電流範圍值，電磁鐵所產生的電磁力與帶有永久磁性的作動原件產生磁力排斥，當電磁力的推力大到可以推動雙穩態機構便可使雙穩態機構從第一穩定位置迅速跳動到第二穩定位置，藉此來切斷電流，如圖 2-5 所示。

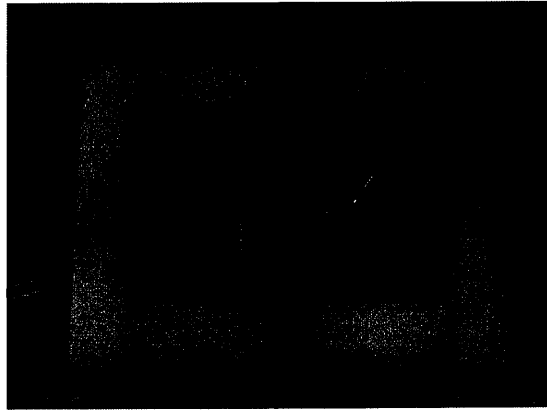


圖 2-4 電磁式電斷路器未作動示意圖

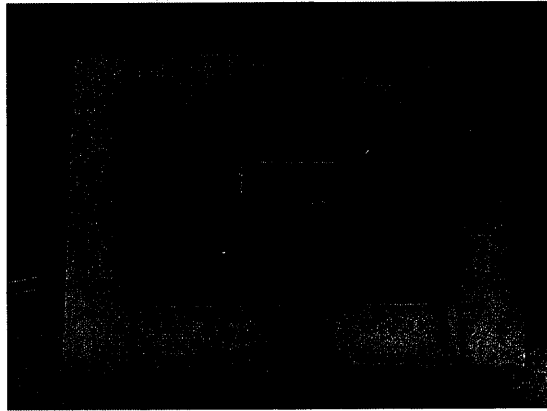


圖 2-5 電磁式電斷路器已作動示意圖

## 2.2 電磁鐵的原理

電磁鐵是可以通電流來產生磁力的裝置，在現今電力系統已經非常普及的社會中是一項不可缺少的工具，是屬於非永久性磁鐵，與永久磁鐵同為磁鐵的一種。

當直流電通過導體時會產生磁場，而通過作成螺線管的導體時則會產生類似棒狀磁鐵的磁場。在螺線管的中心加入一磁性物質則此磁性物質會被磁化而達到加強磁場的效果。

一般而言，電磁鐵所產生的磁場強度與直流電大小、線圈圈數及中心的導磁物質有關，在設計電磁鐵時會注重線圈的分佈和導鐵物質的選擇，並利用直流電的大小來控制磁場強度。然而線圈的材料具有電阻而限制了電磁鐵所能產生的磁場大小，但隨著未來的科技發展中超導體的發現與應用將有機會突破現有的磁力限制。

### 2.2.1 電磁鐵的磁力方向

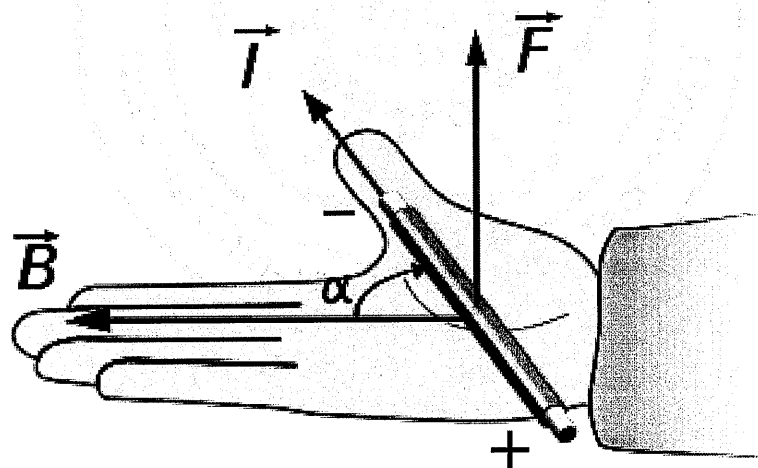


圖 2-6 右手定則說明圖

資料來源 維基百科

如圖 2-6 所示，作用於電流或是正在移動中的正電荷的磁力的方向可以由右手定則來決定。使用右手，將大拇指朝向電流方向，再將其它四根手指朝著磁場方向指去，則掌心所面對的方向就是磁力的方向。由於正電荷移動的方向相反於負電荷移動的方向，但都會形成同樣方向的電流，只靠著測量產生的磁場，並不能分辨出到底是正電荷在移動還是負電荷在以相反方向移動。想要分辨出電荷載子的種類，必須施加外磁場垂直於電荷移動方向，使得電荷因感受到勞倫茲力而偏向一邊，從測量兩邊之間的電壓，可以偵測出到底是哪種電荷在移動[1]。

### 2.2.2 電磁鐵的特性

1. 電磁鐵和永久磁鐵的兩端磁力最強。
2. 電磁鐵的磁力大小可以改變。
3. 電磁鐵的方向可以改變。
4. 電磁鐵導磁物的導磁性越強磁力越強。
5. 電磁鐵輸入電流越大磁力越強。
6. 電磁鐵線圈匝數越多磁力越強。
7. 電磁鐵導磁物截面積越大磁力越大。



### 2.2.3 馬克士威方程組

馬克士威方程組是英國物理學家詹姆斯·馬克士威在 19 世紀建立的一組偏微分方程式，描述電場、磁場與電荷密度、電流密度之間的關係。它含有的四個方程式分別為：電荷是如何產生電場的高斯定理；論述了磁單極子不存在的高斯磁定律；電流和變化的電場是怎樣產生磁場的馬克士威-安培定律，以及變化的磁場是如何產生電場的法拉第電磁感應定律。

馬克士威方程組乃是由四個方程式共同組成的。它們分別為

高斯定律描述電場是怎樣由電荷生成的。更詳細地說，通過任意閉合表面的電通量與這閉合表面內的電荷之間的關係。

高斯磁定律表明，通過任意閉合表面的磁通量等於零，或者，磁場是一個螺線向量場。換句話說，類比於電荷的磁荷，又稱為磁單極子，實際並不存在於宇宙。

法拉第電磁感應定律描述含時磁場怎樣生成電場。許多發電機的運作原理是法拉第電磁感應定律裡的電磁感應效應：機械地旋轉一塊條形磁鐵來生成一個含時磁場，緊接著生成一個電場於附近的導線。

馬克士威-安培定律闡明，磁場可以用兩種方法生成：一種是靠電流（原本的安培定律），另一種是靠含時電場（馬克士威修正項目）。這個定律意味著一個含時磁場可以生成含時電場，而含時電場又可以生成含時磁場。這樣，理論上允許電磁波的存在，傳播於空間。[1]

#### 2.2.4 磁場的原理

磁場：在磁極或任何有電流迴路的周圍附近以及被磁化之後的物體內外，都對磁針或者是運動電荷具有磁力的效果，這種有磁力作用的空間就稱為磁場。它和電場很相似，也是具有力和能的特性。

由於磁體的磁性來自於電流，電流是電荷的運動，概括的來說，磁場是由運動電荷或變化電場所產生的。磁場的基本特徵是能對其中的運動電荷施加作用力，磁場對電流、對磁性體的作用力或力矩皆來自於此。

與電場相似，磁場是在一定空間的區域內連續分佈的矢量場，描述磁場的基本物理量是磁感應強度矢量 $B$ ，也可以用磁力線來圖示。然而，作為一個矢量場，磁場的性質與電場頗為不同。運動電荷或變化電廠的磁場，或兩者之和的總磁場，都是無源有旋的矢量場，磁力線是閉合的曲線，不中斷，不相交。換句話說，在磁場中是不存在發出磁力線的源頭，也不存在匯聚磁力線的終點，磁力線閉合表明沿磁力線的環路積分不為零，即磁場是有旋場而不是保守場，不存在類似於電勢那樣的標量函數。

電磁場是電磁作用的傳遞物，是統一化的整體，電場和磁場互相緊密聯繫、相依相存的兩個場，變化的電場產生磁場，變化的磁場產生電場，變化的電磁場以波動形式在空間傳播。電磁波以有限的速度傳播，具有可交換的能量和動量，電磁波與實物的相互作用，電磁波與粒子的相互轉化等等，都證明電磁場是客觀存在的物質，它的特殊只在於沒有靜質量。

磁現象是最早被人類認識的物理現象之一，指南針是中國古代的一大發明。磁場是廣泛存在的，地球、恆星、星系、行星、衛星，以及宇宙都存在著磁場。為了認識和解釋其中的許多物理現象和過程，必須考慮磁場這一個重要因素。

在現代科學技術和人類生活中，處處可遇到磁場，發電機、電動機、變壓器、電報、電話、收音機以至加速器等無不與磁現象有關。甚至在人體內，伴隨著生命活動，一些組織和器官內也會產生微弱的磁場。

按照磁場對於周圍環境的影響，可以用幾種等價的方法來定義磁場。例如，類似於電場，磁場對電荷會施加作用力；但與電場不同的是，它只對移動中的電荷施加作用力，而且作用力的方向垂直於磁場本身和電荷速度。

這作用力稱為勞倫茲力，以方程式表示，

$$F = qv \times B \quad (1)$$

其中，

F 是作用力，以牛頓為測量單位，

q 是電荷量，以庫侖為測量單位，

v 是電荷 q 的速度，以公尺／秒為測量單位。

另外一種對於磁場的工作定義是由處於磁場的磁偶極子所感受到的力矩給出，以方程式表示，

$$\tau = \mu \times B \quad (2)$$

其中，

$\tau$ 是力矩，以牛頓·公尺為測量單位，

$\mu$ 是磁偶極子的磁偶極矩，以公尺平方·安培為測量單位[2]。



### 2.2.5 B場與H場原理介紹

在各個學術領域裡，磁場會被用來稱呼兩種不同的向量場，分別標記為 H 和 B。向量場 H 又時常稱為「磁場強度」(magnetic field intensity 或 magnetic field strength)或「輔助磁場」(auxilliary magnetic field)或乾脆「H場」。向量場 B 也時常稱為「磁通量密度」(magnetic flux density)、「磁感應強度」(magnetic induction)、「B場」。

雖然「磁場」這個詞彙在歷史上已先被 H場佔有，而只能將 B場稱為「磁感應」，但是現在多數物理學家公認 B場為更基本的物理量，因此他們稱呼 B場為「磁場」。如同命名表格展示，B場和H場的習慣命名並不一致。

輔助磁場 H 以方程式定義為

$$H \stackrel{\text{def}}{=} \frac{B}{\mu_0} - M \quad (3)$$

其中， $\mu_0$ 是磁常數，M是磁化強度。

對於線性物質，磁化強度與 B 成正比，B 與 H 之間的關係為

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (4)$$

其中， $\mu$  是磁導率。

在自由空間裏，磁化強度等於零，所以，

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad (5)$$

對於很多其它物質，磁化強度與  $B$  之間的關係相當複雜。例如，鐵磁性物質和超導體的磁化強度是  $B$  的多值函數(multivalued function)。這現象稱為遲滯現象。

在國際單位制裡， $B$  場的單位為特斯拉 (tesla)，等價於韋伯 (weber) / 平方米，或伏特·秒 / 平方米。在 CGS 單位制裡， $B$  場的單位為高斯 (gauss)。1 特斯拉等於 10,000 高斯。在國際單位制裡， $H$  場的單位為安培 / 公尺；在 CGS 單位制裡， $H$  場的單位為奧斯特 (oersted)。[2]

#### 2.2.6 磁滯現象介紹

磁滯現象在鐵磁性材料中是被廣泛認知的。是指在磁化和去磁過程中，鐵磁質的磁化強度不僅依賴於外磁場強度，還依賴於原先磁化強度的現象。

當外加磁場施加於鐵磁質時，其原子的偶極子按照外加場自行排列。即使當外加場被撤離，部分排列仍保持：此時，該材料被磁化。在該材料中，磁場強度 ( $H$ ) 和磁感應強度 ( $B$ ) 之間的關係是非線性的。如果在增強場強條件下，此二者關係將呈曲線上升到某點，到達此點後，即使場強  $H$  繼續增加，磁感應強度  $B$  也不再增加。該情況被稱為磁飽和 (magnetic saturation)。

如果此時磁場線性降低，該線性關係將以另一條曲線返回到 0 場強的某點，該點的  $B$  將被初始曲線的磁感應強度量  $B_R$  叫做剩磁感應強度或剩磁 (remanent flux density) 相抵消。

該現象的實際影響可為，例如，當通過磁芯的外加電流被撤離，由於殘留磁場繼續吸引電樞，而引起滯後從而延遲磁能的釋放[2]。

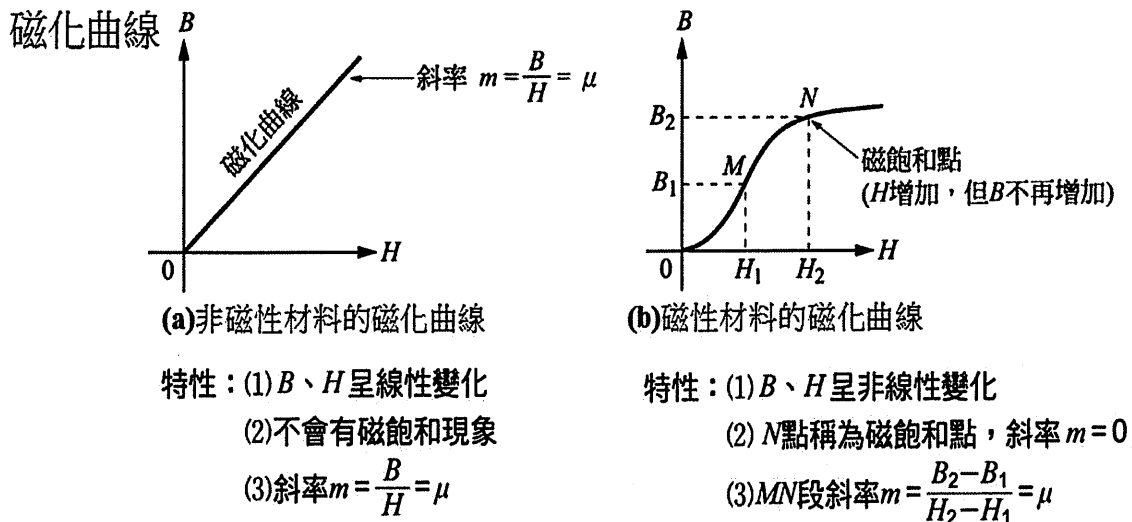


圖 2-7 磁化曲線圖

資料來源 基本電學

### 2.2.7 磁導率介紹

在電磁學中，磁導率是一種材料對一個外加磁場線性反應的磁化程度。磁導率通常用希臘字母  $\mu$  來表示。該形式由奧利弗·黑維塞於 1885 年 9 月創造使用。

在國際單位制單位中，磁導率的單位是亨利每米 ( $\text{H}/\text{m}^{-1}$ )，或牛頓每安培的平方 ( $\text{N}\cdot\text{A}^{-2}$ )。常數值  $\mu_0$  為磁場常數或真空磁導率，並有明確定義<sup>[1]</sup> 值  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{A}^{-2}$ 。

介質	磁化係數( $\chi_m$ )	磁導率 ( $\mu$ )	磁場	最大頻率
$\mu$ 合金	20,000	$25,000 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$	在 0.002 T	
透磁合金	8000	$25,000 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$	在 0.002 T	
電爐鋼	4000	$5000 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$	在 0.002 T	
亞鐵鹽 (鎳 鋅)		$20-800 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$		100kHz ~ 1 MHz
亞鐵鹽 (錳 鋅)		$>800 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$		100kHz ~ 1 MHz
銅	700	$875 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$	在 0.002 T	
鎳	100	$125 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$	在 0.002 T	
鉑	$2.65 \times 10^{-4}$	$1.2569701 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$		
鋁	$2.65 \times 10^{-4}$	$1.2566650 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$		
氫	$8 \times 10^{-9}$ or $2.2 \times 10^{-9}$	$1.2566371 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$		
真空	0	$1.2566371 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$		
銅	$-6.4 \times 10^{-6}$ or $-9.2 \times 10^{-6}$	$1.2566290 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$		
水	$-8.0 \times 10^{-6}$	$1.2566270 \times 10^{-6} \text{ H/m}^{-1}$		

表 2-1 材料的磁化係數和磁導率的數據圖



## 永久磁鐵

磁鐵是可以產生磁場的物體，為一磁偶極子，能夠吸引鐵磁性物質如鐵、鎳、鈷等金屬。磁極的判定是以細線懸掛一磁鐵，指向北方的磁極稱為指北極或 N 極，指南方的磁極為指南極或 S 極。（如果將地球想成一大磁鐵，則目前地球的地磁北極是 S 極，地磁南極則是 N 極。）磁鐵異極則相吸，同極則排斥。指南極與指北極相吸，指南極與指南極相斥，指北極與指北極相斥。

磁鐵可分作「永久磁鐵」與「非永久磁鐵」。永久磁鐵可以是天然產物，又稱天然磁石，也可以由人工製造（最強的磁鐵是釹磁鐵）。而非永久性磁鐵，只有在某些條件下會有磁性，通常是以電磁鐵的形式產生，也就是利用電流來強化其磁場。

未磁化的磁石內部磁分子（分子磁鐵學說）是無規則排列的，經過磁化的過程後磁分子會有規則的排列。此時，磁分子的 N 極和 S 極會朝向相同方向使磁石具有磁性而成為磁鐵。同時，同一磁鐵上存在相反兩極且兩極之磁量相等。

## 磁性種類

### 1. 反磁性

這是一種最常見的磁性行為。反磁性物質的磁化強度的大小與外磁場的大小成正比，但是方向與外磁場方向相反。所有的物質都具有反磁性響應，很多時候，這響應可能會被更強烈的磁性行為遮蓋住。反磁性可以解釋為束縛於原子內部的電子的軌域對於外磁場的正常響應。

這是一種弱磁性，不具有永久性，只有當外磁場施加時才存在。感應出來的磁偶極矩的大小與外磁場成正比，但是方向相反。因此，反磁性物質的相對磁導率小於1，磁化率是負值。假設在馬蹄形電磁鐵的兩極之間，置入一塊反磁性物質，由於磁化強度反抗電磁鐵的磁場，反磁性物質會被往外推出，推到磁場較弱的地方。

### 2. 順磁性

順磁性物質的磁化強度的大小與外磁場的大小成正比，而且方向相同。這是因為物質內的電子的自旋所產生的磁偶極矩，會與外磁場耦合，產生矯正方向的作用力，使得自旋方向會依著磁場線排列。由於包立不相容原理，處於原子內的同一軌域的兩個電子的自旋方向必須相反。這使得順磁性效應相互抵銷。所以，順磁性通常只會出現於擁有奇數數目電子的原子。

假設在馬蹄形電磁鐵的兩極之間，置入一塊順磁性物質，由於磁化強度傾向電磁鐵的磁場，順磁性物質會從磁場較弱的地方，被拉往磁場較強的地方。

順磁性與溫度成反比。

### 3. 超順磁性

超順磁性物質是磁化率超高的順磁性物質。這物質是用淨磁偶極矩質很高的磁奈米粒子聚集體得到的。每一個粒子是一個單獨磁域。因此，處於外磁場的作用，粒子的自旋不再會被磁域壁阻礙。

超過某特定溫度（稱為阻擋溫度，熱力震動會隨機地變動淨自旋，因而相互抵銷，造成集體粒子在零磁場的淨磁矩等於零。假若施加外磁場，則粒子會依著磁場線排列，形成淨磁偶極矩。這種物理行為是順磁性物質特有的行為，唯一的不同是在這裡，每一個奈米粒子擁有高值的淨磁偶極矩。因此，磁化率超高。

### 4. 鐵磁性

日常常見的磁鐵大多數是鐵磁性物質。鐵磁性物質不需要外磁場就能夠顯示出淨磁性，這現象稱為自發磁化（英語：spontaneous magnetization），指的是處於外磁場等於零的狀況，物質仍舊具有淨磁偶極矩。鐵磁性物質內部的鄰近磁偶極子之間的強烈量子耦合，促使鄰近磁偶極子喜歡朝著同樣方向排列。鐵磁性物質內部會形成一個區域一個區域的磁域，每一個磁域內的磁偶極子都朝著同樣方向排列。然而，這方向是隨機的。所以，鐵磁性物質的平均磁偶極矩會因為相互抵銷而消滅。

當施加外磁場時，由於外磁場的力矩，會促使磁域的磁偶極子依著外磁場線排列。隨著外磁場的增強，磁化強度也會增強，直到飽和點。這時，增強外磁場不會改變磁化強度。假設，現在減弱外磁場，磁化強度也會跟著減弱。但是不會與先前

對於同一外磁場的磁化強度相同。磁化強度與外磁場的關係不是一一對應關係。磁化強度比外磁場的曲線形成了磁滯迴線[2]。

### 2.2.8 電磁力原理介紹

移動於磁場中的帶電粒子會感受到勞倫茲力。其大小與磁場，粒子的帶電量、粒子垂直於磁場的移動速度成正比，以方程式表示，

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (6)$$

其中， $\mathbf{F}$  是勞倫茲力， $q$  是粒子的帶電量， $\mathbf{v}$  是粒子的移動速度。

勞倫茲力必定垂直於  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{v}$ 。固定不動的粒子或沿著磁場線移動的粒子都不會感受到任何勞倫茲力。帶電粒子繞著磁場線移動的軌跡是圓形的（更一般地，由於帶電粒子可能會沿著磁場線移動，軌跡是螺旋形的），這運動稱為迴旋運動 (cyclotron motion)。由於磁力永遠垂直於移動方向，磁場不能做任何機械功於孤獨電荷。但是，磁場可以改變粒子的移動方向，甚至於使得感受到某外力作用的粒子會朝著垂直於那外力的方向漂移。

#### 載流導線所感受到的磁力

由於電流是一群移動中的帶電粒子所形成的巨觀效應，載流導線所感受到的磁力類似移動中的帶電粒子所感受到的磁力。處於磁場中的載流導線會感受到一種側向力。

假設電場為零，則作用於移動速度為  $V$  的電荷  $q$  的勞倫茲力是

$$F = qv \times B \quad (7)$$

對於線電荷密度為  $\lambda$  的載流導線，總勞倫茲力為

$$F = \int_C v \times B dq = \int_C v \times B \lambda d\ell = \int_C I \times B d\ell \quad (8)$$

其中， $C$  是積分路徑， $I = \lambda v$  是電流向量。

假設電流是穩定電流，則可以將電流從積分內提出，用微小線元素向量  $d\ell$  來表示電流  $I$  的方向：

$$F = I \int_C d\ell \times B \quad (9)$$

這公式給出了處於外磁場的載流導線所感受到的磁力。使用這公式和必歐-沙伐定律，就可以推導出安培力定律。

假設，磁場是均勻磁場，積分路徑是垂直於磁場的直線，則

$$F = ILB \quad (10)$$

其中， $L$  是積分路徑  $C$  的長度[3]。

### 2.2.9 磁場線原理介紹

磁場的方向可以藉著磁偶極子的性質來表示；磁場中的磁偶極子會沿著磁場線平行排列，其中的一個顯著例子就是磁鐵周圍的鐵粉分佈圖案。將條狀磁鐵放在白紙下面，鋪灑一堆鐵粉在白紙上面，這些鐵粉會依著磁場線的方向排列，形成一條條的曲線，在曲線的每一點顯示出磁場線的方向。這曲線圖稱為「場線圖」。

繪製場線圖是一種很簡單的、描述磁場（或任意其它向量場）的方法，在空間的任意位置的磁場可以從場線圖在對應位置的場線方向和密度估計出來。磁場線密度越高表示磁場越強勁。場線圖的繪製相當容易。首先，在每一個位置測量磁場的強度和方向。按照所得數據，在圖紙的對應位置繪出一條跟磁場同方向的箭桿。然後，將每條箭桿之首部與前面的箭桿之尾部連接起來，形成磁場線，確使磁場線密度與磁場的強度成正比。這樣，就可以繪製出一幅場線圖。這是一種很優良的磁場視覺化方法。想像磁場線會沿著線徑施加張力（像一條橡皮圈），又會垂直於線徑對鄰近的磁場線施加壓力，這就是磁力的物理行為。兩塊磁鐵的異性磁極互相吸引，這是由於它們被很多條磁場線連結；反之，兩塊磁鐵的同性磁極互相排斥，這是由於它們的磁場線不相交接，因為互相平行，造成互相推擠。

磁場在任意位置的方向可以用羅盤來顯示。羅盤可以顯示出一個條形磁鐵的磁場方向。由於異性磁極相互吸引，羅盤磁針的指北極會被磁鐵的指南極(S極)吸引；由於同性磁極相互排斥，磁針的指北極會被磁鐵的指北極(N極)排斥。在磁鐵的指南極附近，磁場指向磁鐵；在指北極附近，磁場背向磁鐵。載流導線產生的磁場不會指向導線，也不會背向導線，而會環繞著導線[2]。

## 2.3 雙穩態結構的原理

### 2.3.1 雙穩態結構說明

所謂的雙穩態(Bistable)是意指該結構，在有限的範圍內不需藉由外力的幫助便可維持於一個穩定的位置上，受到外力後則是會彈跳至下一個穩定位置，該結構可在這兩種穩定的位置上相互切換。此種在兩種不同位置上皆擁有穩定狀態的結構稱之為雙穩態結構，如圖 2-8 所示。

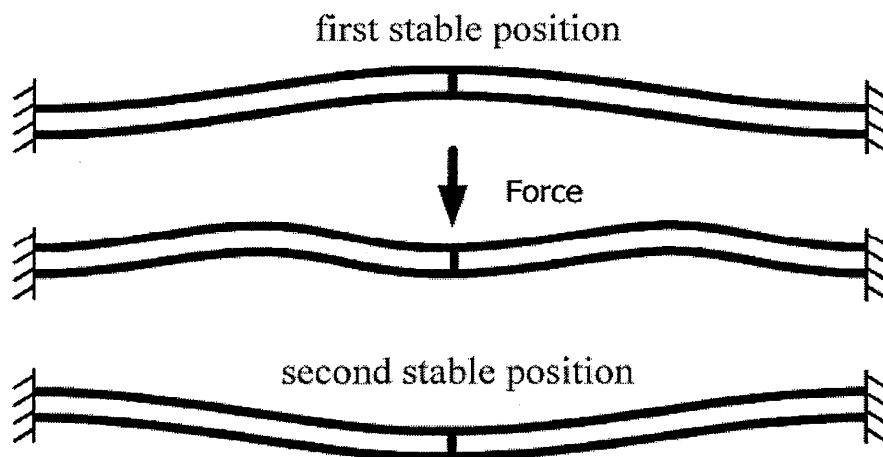


圖 2-8 雙穩態結構示意圖[4]

在文獻中有不同的雙穩態機構例子，例如接觸機構（latch-lock mechanisms）、多段絞鏈機構（hinged multisegment mechanisms）或兼容的雙穩態機構（compliant bistable mechanisms），和殘餘壓應力的屈曲梁（residual compressive-stress buckled-beam）。

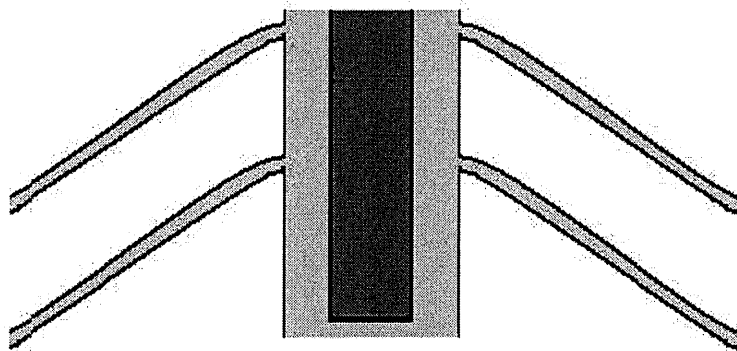


圖 2-9 標準的機構型雙穩態機構圖

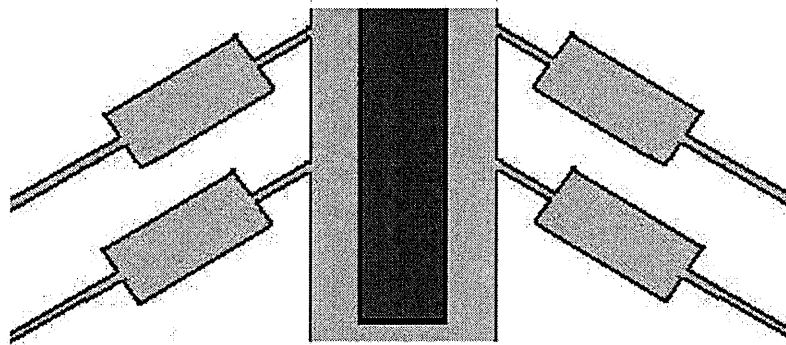


圖 2-10 中央有固定塊的平行梁雙穩態機構圖

如圖 2-9 所示，標準的機構型雙穩態機構中，一個整體的雙穩態機構裡面是沒有



任何殘留應力存在於雙穩定支梁上。它的雙穩定結構包括有兩個中央限制平行的支梁並且支梁是可以非常容易彎曲的材質，但是支梁裡是沒有殘餘應力的。在中央有固定塊的平行梁雙穩態機構圖之中，如圖 2-10 所示，在雙穩態結構中中間連接的支柱上加入一個較寬部分。每一個支柱中心有一個堅固的部分和兩段比較容易彎曲的部分。而這些設計裡包含有幾個好處。由於其結構是非常容易於大量製造的，因為它的組成只需要一層金屬或者是商業用塑膠板（聚甲醛樹脂與 ABS 塑料）所以是不需要用接頭或者是複雜組裝。而且雙穩態結構是只會在第一與第二穩定位置間來回的跳動並不會產生應力抵銷而處於在其他的位置上停留的可能性。並且可以藉由有限元素分析軟體 ANSYS 裡來分析機構作動的相關物理分析。

### 2.3.2 柔性連結系統

有別於一般傳統上利用關節或者是鏈條雙穩態結構，使用彎曲梁作為結構與結構之間的柔性連結系統，由於連結的零件數量減少可以減少裝配時間、並且簡化製造流程可以降低成本，在應用方面擁有體積小、重量輕、容易安置於微小結構上、磨損量低、設計簡單降低維修次數、可靠性精確度高等，基於以上優點柔性連結系統常被應用於微小尺寸的設計上[5]。

### 2.3.3 雙穩態機制介紹

雙穩態機制擁有兩個穩定的平衡狀態、一個不穩定平衡狀態，該機制在一般情況下無需借由外力幫助便可停留在穩定平衡的位置上，當受到外力施以超過臨界點的力量干擾時會由一穩定位置經過不穩定位置移動到另一個穩定位置上，該

機制可在這兩種穩定的平衡狀態上相互切換。此種現象可藉由圖 2-11 來做解釋 [5, 6, 7]。

小球在崎嶇的山路上擁有四種可能的狀態，當球在狀態一、二的位置時為穩定平衡狀態，此時受到外界力量的干擾小球也只會產生些許的振盪繼續停留在狀態一、二的位置，當球在狀態三的位置時為不穩定平衡狀態，此時只需一點點的干擾變能驅使小球往狀態一或二的位置做大位移量的移動。

擁有雙穩態機制的結構不需透過彈簧或其它的驅動裝置便可將應變能儲存於柔性關節中作為驅動的能量。

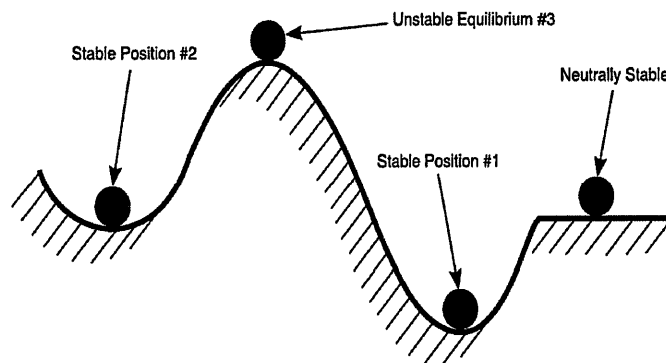


圖2-11 雙穩態機制的平衡示意圖

由於雙穩態結構簡單容易微型化、高重複性的定位、結構重量輕、結構控制簡單、驅動能量低、使用彎曲梁作為柔性傳動結構可減少摩擦避免能量損失以及不需要輸入額外的能量便能使該結構維持於一個穩定的位置上，可以保持常開或關閉狀態等等優點，目前已被應用於多種穩態機制中例如：繼電器、微控制閥門、洗髮

水瓶蓋、碰撞感測器、光學系統切換開關等等，另外在 MEMS 方面也有出色的應用。

以下文獻中皆有應用到雙穩態結構：

J Barth[8]將形狀記憶合金作為彎曲梁及外力驅動源，利用磁鐵吸力來訂定穩定位製作出—形狀記憶合金微驅動雙穩態結構，如圖 2-12 所示。

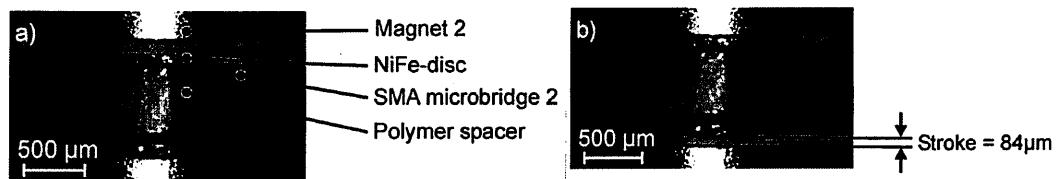


圖2-12 形狀記憶合金微驅動雙穩態結構圖

Y. Gerson[9]、D. A. Wang[10]皆使用微機電半導體製程技術製作一個雙穩態微型致動器，並藉由分析軟體分析其性能，如圖 2-13 所示。

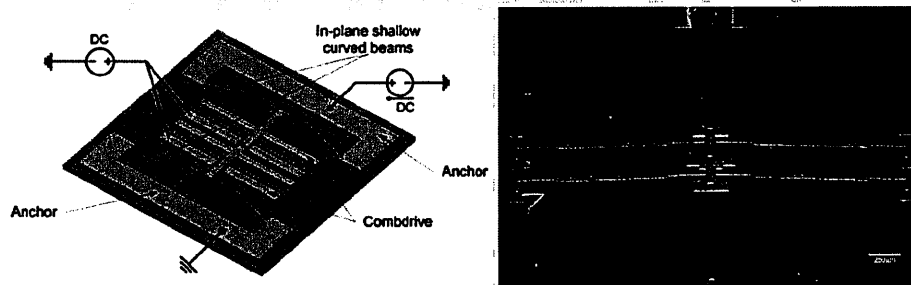


圖2-13 可調節式的靜電驅動雙穩態微型致動器與電磁驅動雙穩態微型致動器圖

Huy-Tuan Pham[11, 12]設計一種新型的恆定力雙穩態機制 (CFBM)，藉由有限元素分析來探討此結構的恆定輸出力以及移動範圍，未來可應用於各種設備的過載保護裝置，如圖 2-14 所示。

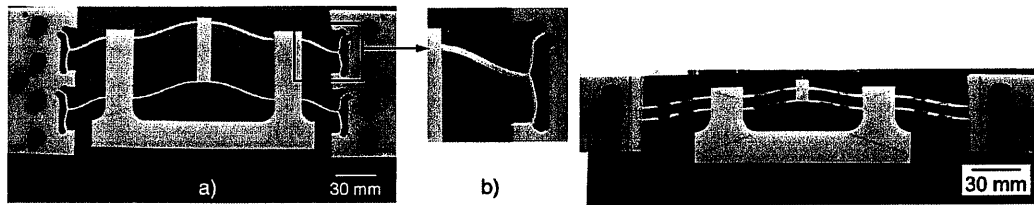


圖2-14 恆定力雙穩態結構 (CFBM) 模型

B. J. Hansen[13]使用塑料片切割出一個封閉式的雙穩態結構，利用離心力作為驅動力完全不需仰賴電力，未來可應用於動能式感測開關，如圖 2-15 所示。

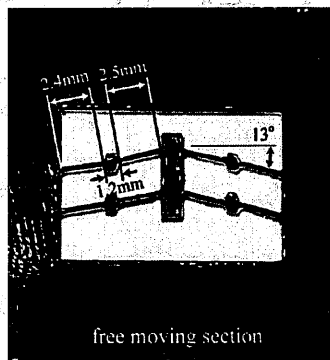


圖2-15 封閉式雙穩態結構

Han, J. S. [14]製造一個擁有 X 和 Y 方向的雙穩態結構，它提供了四種穩定的平衡位置藉由實驗量測分析其性能，未來可應用於多方向性的光學系統切換開關，如圖 2-16 所示。

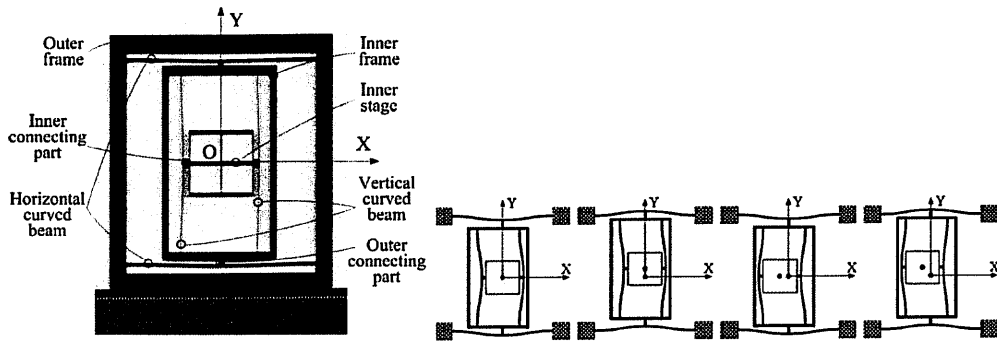


圖 2-16 X 和 Y 方向的雙穩態結構與作動示意圖



## 2.4 導電連接元件原理

### 2.4.1 導電連接元件說明

由於雙穩態結構由第一穩態位置跳動至第二穩態位置有其一定的距離，因此我們必須使電磁鐵的磁推力保持到跳動的位置。因此我們設計出導電通路的導電連接元件。若是沒有導電元件這個零件，磁推力只會維持一下子而不足以推動到跳動點，如圖 2-17 所示。



圖 2-17 導電連接元件說明圖

由於導電連接元件(一)在移動的時候，會與另一個導電連接元件(二)互相的接觸摩擦。因此我們希望因為接觸所產生的阻力越小越好，所以我們採用的不是面跟面的接觸而是採用線跟線的接觸。藉著接觸面積的減小我們可以減少在跳動中所產生的摩擦力，來達到迅速的斷電效果。所以我們設計出採用側面類似 V 字型的接觸方式，此種接觸方式接觸面積小並且在雙穩態機構產生跳動的動作同時其導電連接元件滑動最順暢。如圖 2-18 所示。

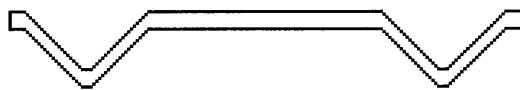


圖 2-18 導電連接元件(一)示意圖

為了使電磁推力能夠持續到雙穩態結構跳動至第二穩態位置，因此導電連接元件(二)的長度則必須足夠讓電磁鐵持續接通到第二穩態位置，並且在跳動的同時斷電。而這一段距離取決於雙穩態機構由第一穩態位置到跳動位置的距離。而導電連接元件(二)邊緣的斜倒角則是讓導電連接元件(一)順利的跳動到第二穩態位置的作用，如圖 2-19 所示。

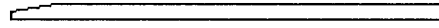


圖 2-19 導電連接元件(二)示意圖





### 第三章 電磁式電斷路器的設計與分析

#### 3.1 雙穩態結構設計與分析

##### 3.1.1 雙穩態結構非線性分析定義

###### 1. 非線性結構的定義

在日常生活中，經常會遇到結構非線性。例如，用釘書機釘書，金屬釘書針將永久地彎曲成一個不同的形狀；如果在一個書架上放置重物，隨著時間的遷移，書架將會變形越來越下垂；當在汽車貨卡車上裝貨時，他的輪胎和路面間的接觸將隨著貨物重量的變化而變化。如果將上面例子的載荷變形曲線畫出來，可以發現它們都顯示了非線性結構的基本特徵——變化的結構剛度，如圖 3-1 所示[15]。

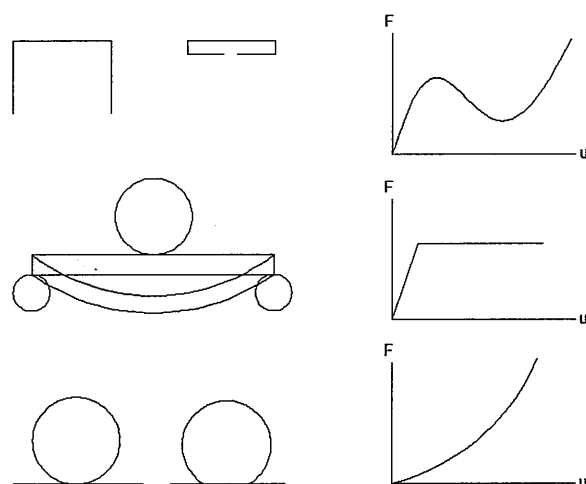


圖 3-1 非線性結構說明圖

## 2. 非線性行為的原因

### (1) 狀態變化(包括接觸)

許多普通結構表現出一種與狀態相關的非線性行為。例如，一根只能拉伸的電纜可能是鬆弛的，也可能是緊繃的；軸承套可能是接觸的，也可能是不接觸的；凍土可能是結凍的，也可能是融化的。這些系統的剛度由於系統狀態的改變而突然變化。狀態改變或許和載荷直接有關(如在電纜情況中)，也可能是由某種外部原因引起的(如在動土中的絮亂熱力學條件)。接觸是一種很普遍的非線性行為，接觸是狀態變化非線性類型中一個特殊而重要的子集，如圖 3-2 所示[15]。

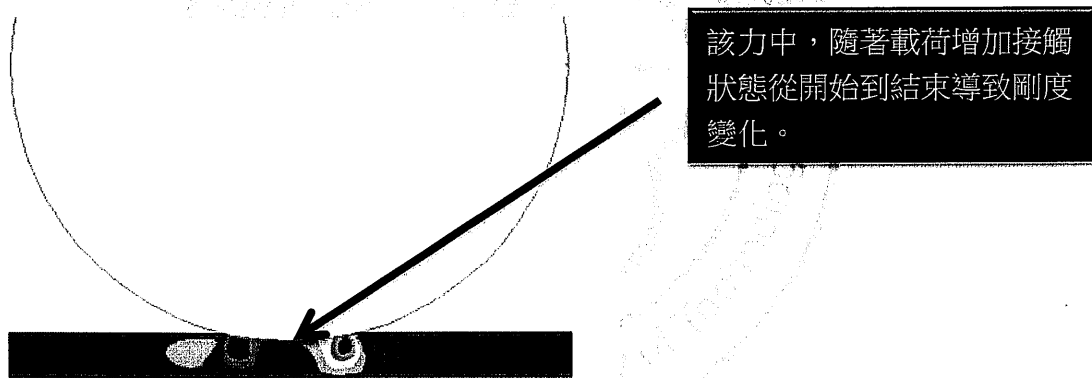


圖 3-2 狀態變化說明圖

### (2) 幾何非線性

結構如果經受大變形，其變化的幾何形狀可能會引起結構的非線性響應。釣魚竿在輕微的載荷作用下，會產生很大的變形。隨著垂向載荷的增加，魚竿不斷彎曲導致動力臂明顯減少，致使魚竿在較高載荷下剛度不斷增加，如圖 3-3 所示[15]。

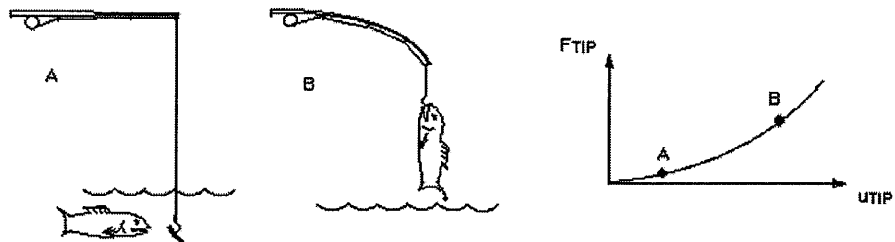


圖 3-3 幾何非線性說明圖

### 3. 大應變效應

一個結構得總剛度依賴於他組成單元的方向和剛度。當一個單元節點經歷位移之後，那個單元對總體結構剛度的貢獻可以以兩種方式改變。首先，如果這個單元的形狀改變，他的單元剛度將改變，其次，如果這個單元的取向改變，他的單元剛度也將改變。小變形和小應變分析假定位移小到足夠使所得到的剛度改變無足輕重。這種剛度不貶假定意味著使用機於最初幾何形狀的結構剛度進行一次疊代足以計算出小變形分析中的位移。相反，大應變分析說明由單元形狀和取向改變導致的剛度改變。因為剛度受到位移影響，且反之亦然，所以在大應變分析中需要多次疊代求解來得到正確的位移。

大應變處理對一個單元經歷的總應變沒有理論限制。然而，應限制應變增量以保持精度。因此，總載荷應當被分成幾個較小的載荷步。無論何時(當系統是非保守系統，在模型中有塑性或摩擦，或者有多個大位移解存在時)使用小的載荷增量都具有雙重重要性，如圖 3-4 所示[15]。

載荷

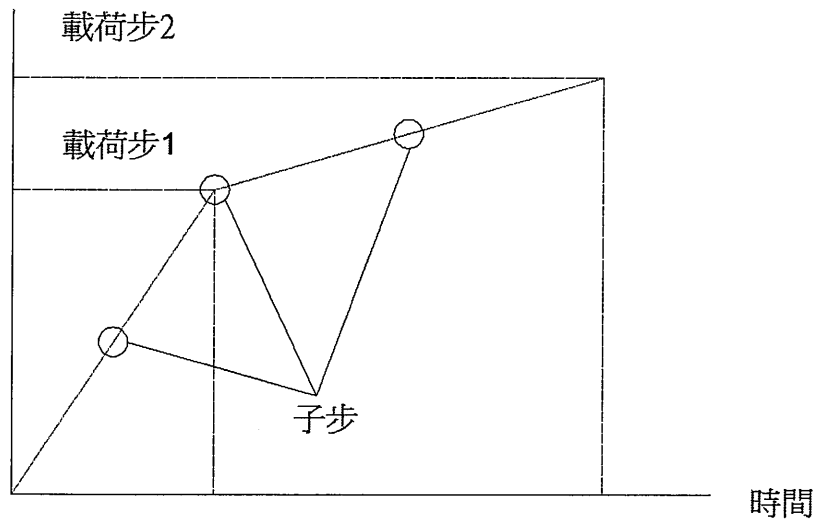


圖 3-4 大應變效應說明圖



### 3.1.2 非線性分析步驟

#### 1. 雙穩定結構尺寸圖

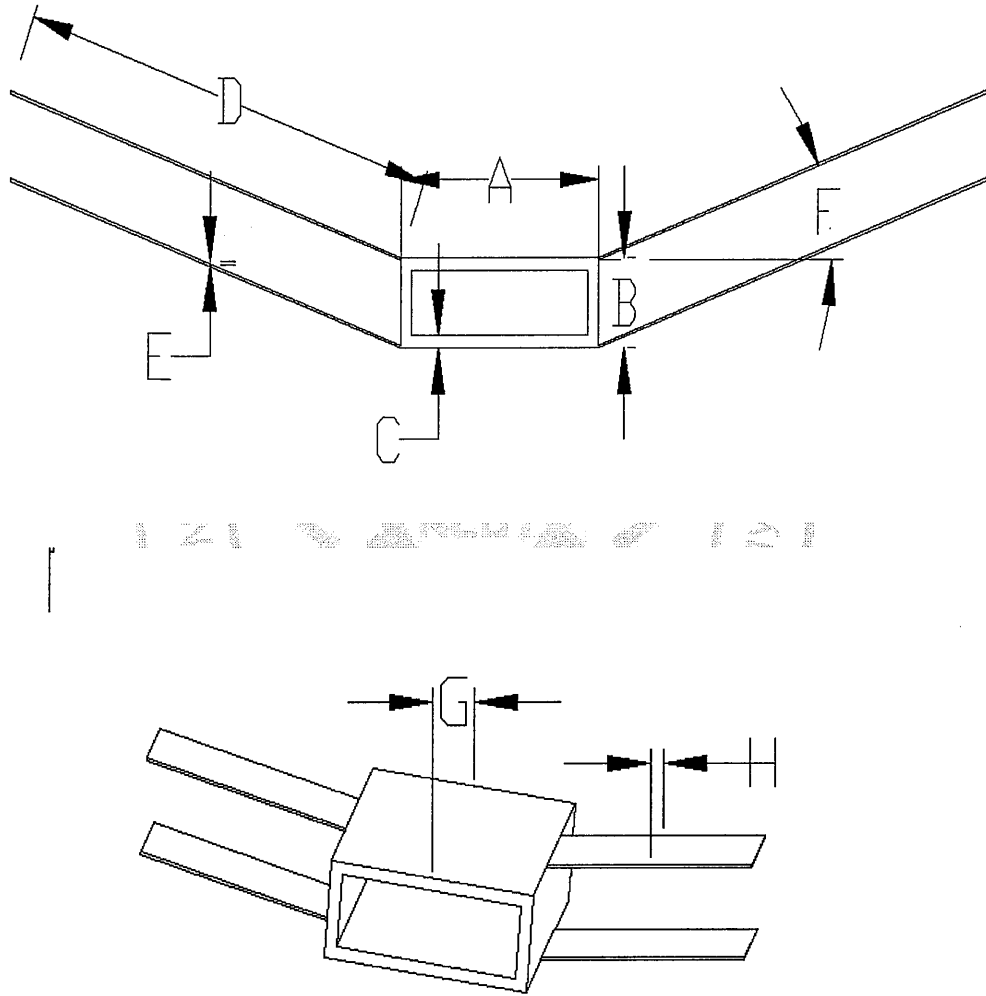


圖 3-5 雙穩定結構尺寸圖

表 3-1 雙穩定結構尺寸表

A - 中心元件寬度	17mm
B - 中心元件高度	8mm
C - 中心元件壁厚	1mm
D - 支樑臂長	17mm
E - 支樑厚度	0.25mm
F - 支樑角度	10 度
G - 中心元件厚度	16mm
H - 支樑寬度	3mm

雙穩定結構機械性質

表 3-2 雙穩定結構材質表

密度	$0.925\text{kg}/\text{mm}^3$
楊氏係數	$2.88 \times 10^4 \text{g}/\text{mm}^2$
蒲松比	0.38

2. 影響雙穩定結構主要的參數有

- (1) 支臂長度
- (2) 支臂角度
- (3) 支臂厚度
- (4) 支臂寬度

### 3. 雙穩定結構非線性分析步驟

#### (1) 選取元素

在進行分析前，我們首先要選擇非線性分析的元素類型。確保所選擇的元素類型必須支持非線性分析。SHELL181和Solid185元素支持所有的三類幾何非線性分析：應力鋼化、大撓度和大應變，如圖3-6所示。

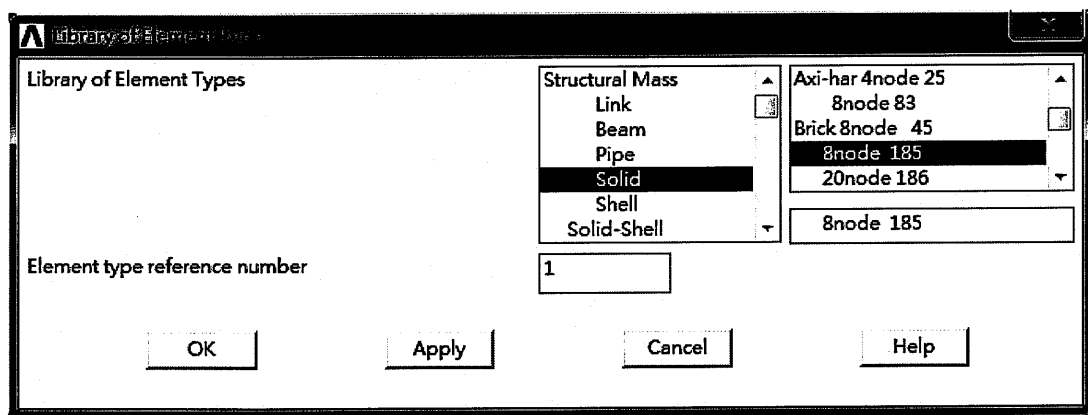


圖 3-6 選取雙穩定結構分析元素圖

#### (2) 輸入材料參數

接著輸入所要分析材料的機械性質，密度、楊氏係數和蒲松比。由於 ANSYS 並沒有單位設置，因此必須由使用者自行使其單位一致，如圖 3-7 所示。

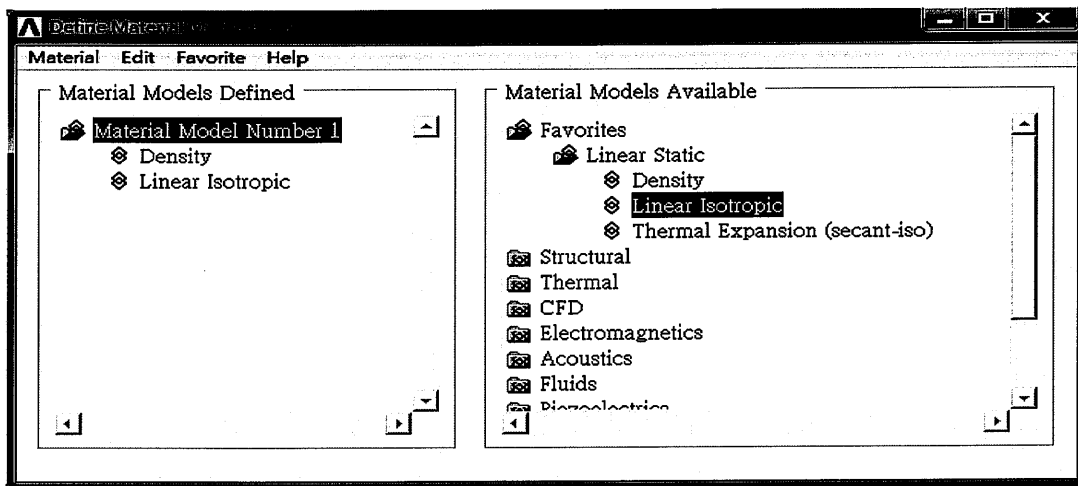


圖 3-7 輸入材料參數圖

### (3) 建立模型

ANSYS 軟體提供了 4 種建立有限元素模型的方法：

直接建模

實體建模

輸入在電腦輔助設計(CAD)中創建的實體模型

輸入在電腦輔助設計(CAD)中創建的有限元素模型

非線性分析的建模過程與線性分析十分類似，只是非線性分析中可能包括特殊的單元或非線性材料性質。如果模型中包含大應變效應，則必須採用真實應力與真實應變數據。

此次分析則是由先行在 Pro/E 軟體先行繪製，再由 ANSYS 裡匯入 Pro/E 圖檔。如此做法可以大量的減少繪圖的時間，並且可以避免人為的繪圖操作疏失，如圖 3-8 所示[15]。



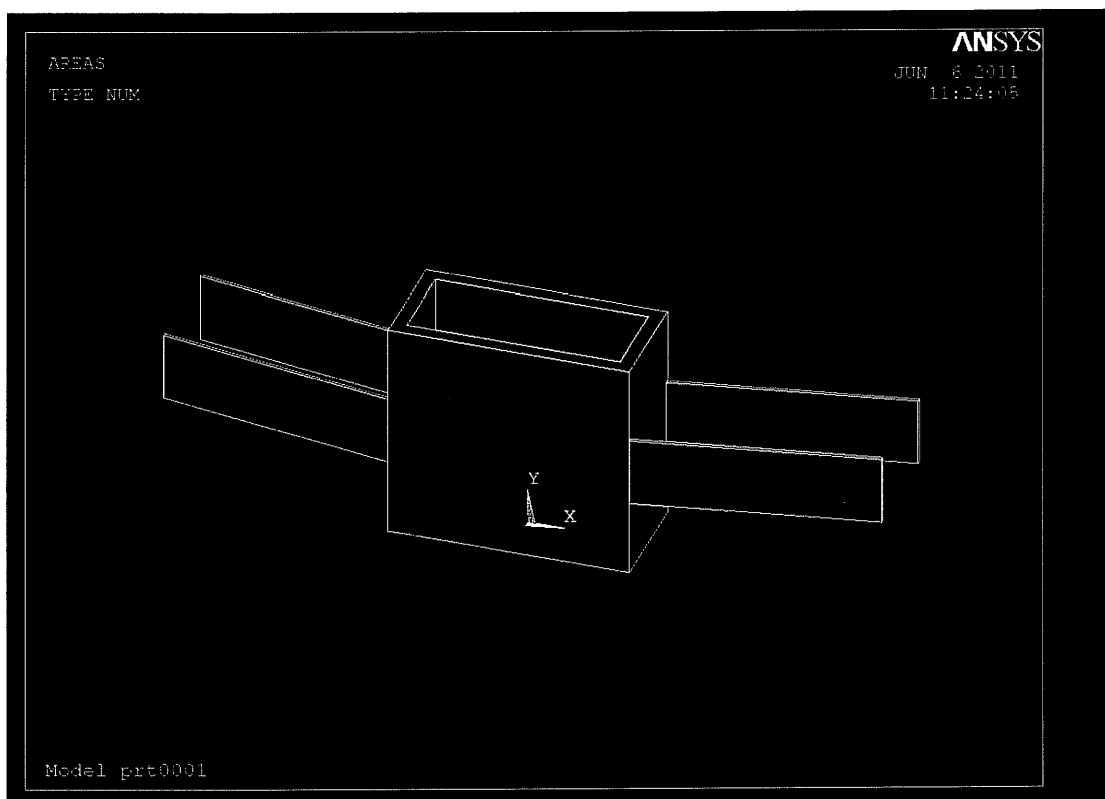


圖 3-8 建立模型圖

#### (4) 切割網格

ANSYS 網格切割的基本原則：

##### 1. 網格數量

網格數量的多少會影響計算結果的精度和電腦運算的時間多寡。一般來說，網格數量增加，計算精度會有所提升，但同時運算時間也會增加，所以在確定網格數量時須衡量兩個因數的平衡。

##### 2. 網格疏密

網格疏密是指在結構不同部位採用不同大小的網格，這是為了適應計算數據的分

佈特點。在計算數據梯度較大的部位(如應力集中處)，為了較好地反映數據變化規律，須採用比較密集的網格。而在計算數據變化梯度較小的部分，為了減少模型規模，則應劃分相對稀疏的網格。

### 3. 單元階次

許多單元都具有線性、二次和三次等形式，其中二次和三次形式的單元稱為高階單元。選用高階單元可以提高計算精度，因為高階單元的曲線或曲線邊界能夠更好的逼近結構的曲線和曲線邊界，且高次插值函數可更高精度地逼近複染場函數，所以當結構形狀不規則、應力分佈或變形很複雜時可以選用高階單元。

### 4. 網格質量

網格質量是指網格幾何形狀的合理性。質量好壞將影響計算精度。質量太差的網格甚至會中止計算。

### 5. 位移協調性

位移協調是指單元上的力和力矩能通過節點傳遞相鄰單元。為保證位移協調，一個單元的節點必須也是相鄰單元的節點，而不應是內點或邊界點。相鄰單元的共有節點具有相同的自由度性質。否則，單元之間需用多點約束等式或約束單元進行約束處理。[26]

在切割模型中，我們先以 SHELL181 先行切割 2D 的平面元素。在切割之前必須大約計算切割的 2D 元素形狀，必須保持正方形為主，若是產生長方形形狀的 2D 網格將會影響到運算精度。在切割 2D 網格之後便可以指定 3D 網格長出的方向，當然在切割 3D 網格時也是必須注意到保持正立方體的原則，如圖 3-9 所示[15]。

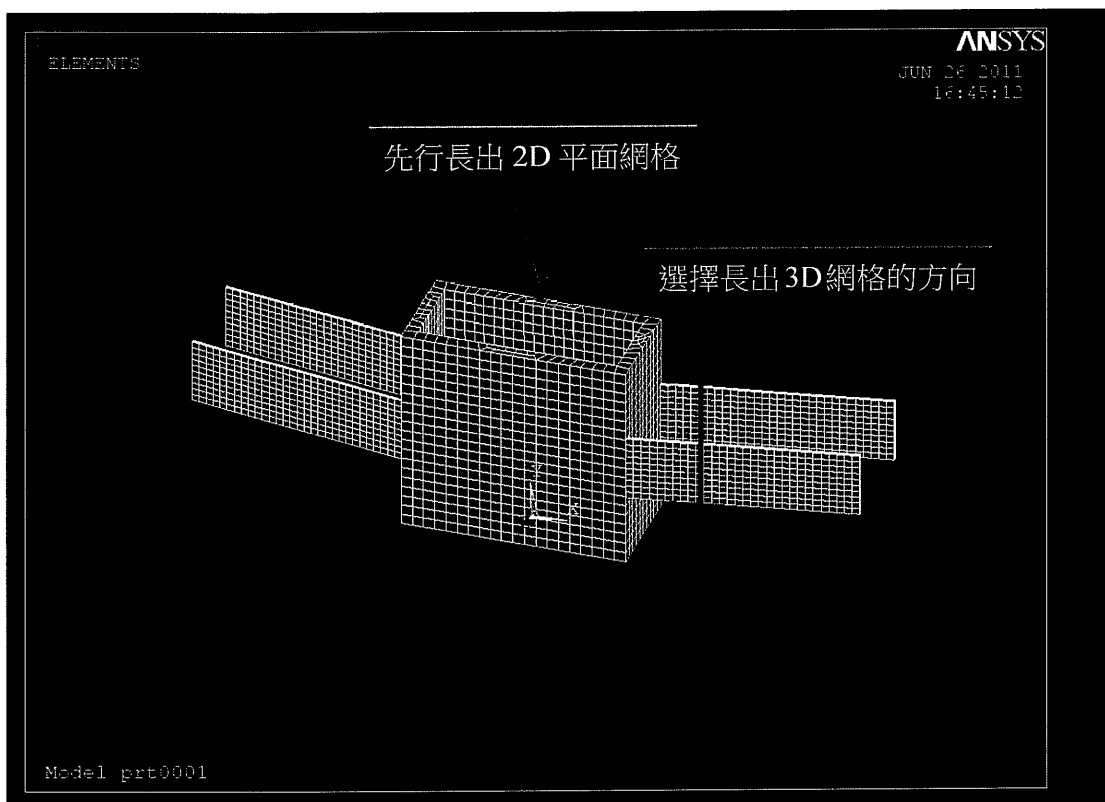


圖 3-9 切割網格圖

#### (5) 施加附載

當切割網格之後，便要對模型進行固定截面積和加載的動作。非線性求解經常需要求解多個載荷增量，且總是需要平衡選代，因此他不同於線性求解。所以先將雙穩態結構的支梁邊端施加固定載負，在藉由固定載負施加在雙穩態的結構面上來強制移動所需要的距離，如圖 3-10 所示。

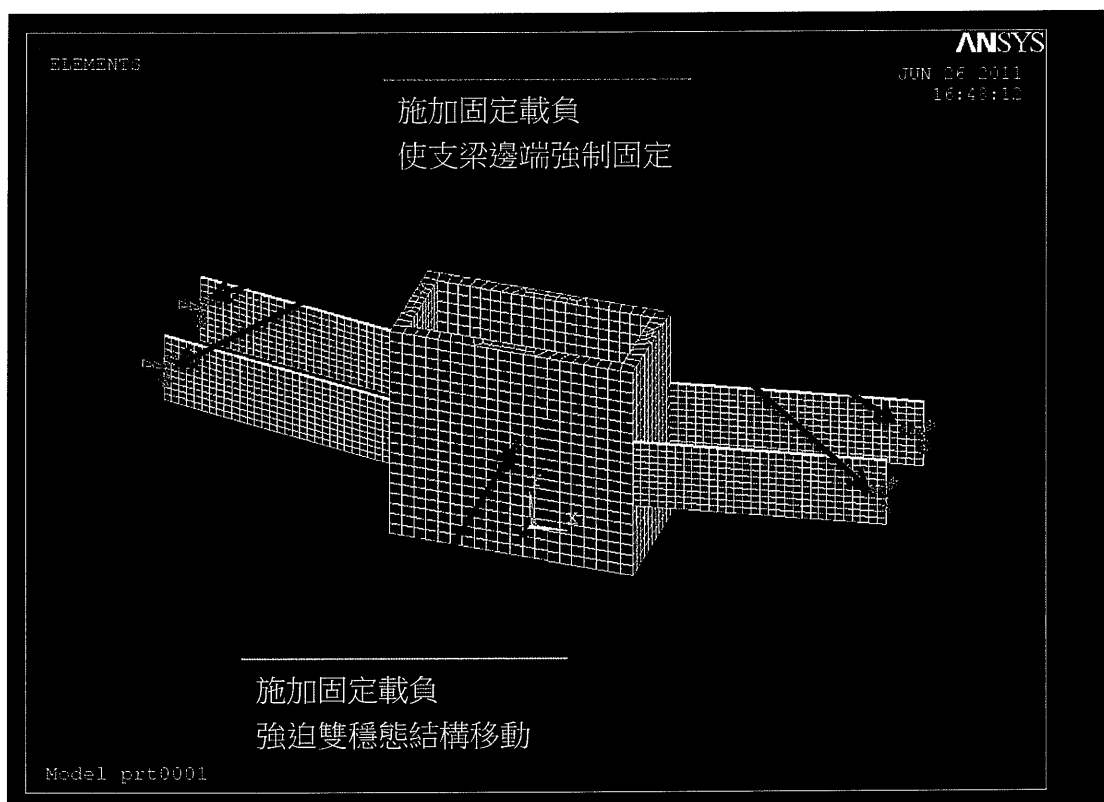


圖 3-10 模型加載圖

#### (6) 分析結果

非線性靜態分析的結果主要包括位移、應力、應變和反作用力。可以用 POST1 通用處理器或 POST26 時間力成後處理器，來考察這些結果，如圖 3-11 所示。

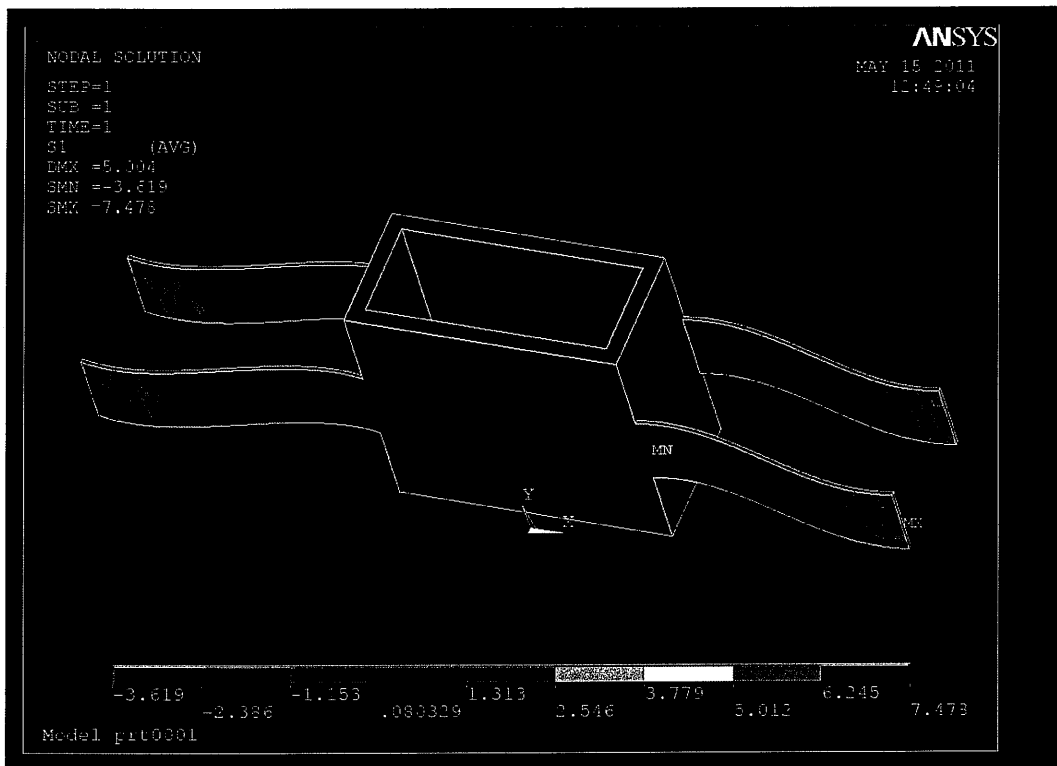


圖 3-11 最大拉應力量

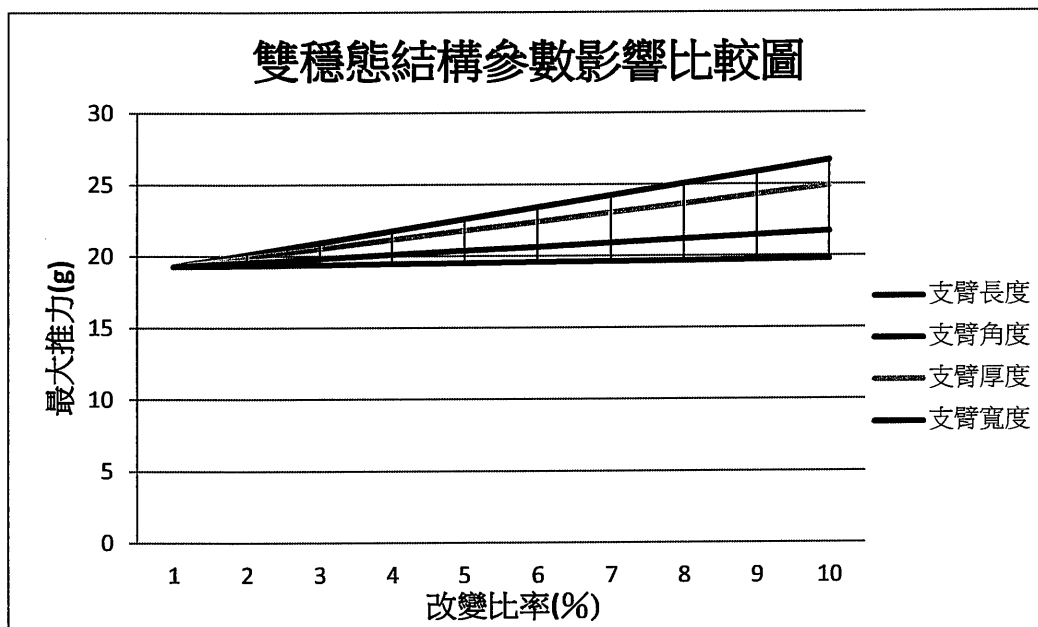


圖 3-12 雙穩態結構參數影響比較圖

由分析的結果可以得知，對於影響最大拉力的主要參數是雙穩態結構的角度，而影響最大拉力最少的參數則是雙穩態結構的長度。因此當我們在設定安全電流值時，便可以充分的利用這 4 種參數來改變我們的雙穩態結構的最大拉力，如圖 3-12 所示。

表 3-3 雙穩定結構影響關係表

部位名稱	支臂長度	支臂角度	支臂厚度	支臂寬度
基本尺寸	17mm	10 度	0.25mm	3mm
總體改變比率	1%	1%	1%	1%
推力改變值(g)	≒0.056g	≒0.823g	≒0.622g	≒0.27g
影響拉力關係 排名	4	1	2	3

(7)分析結果曲線圖

藉由非線性分析所產生的結果，我們可以分析出推動雙穩定機構所需的拉力位移關係圖。

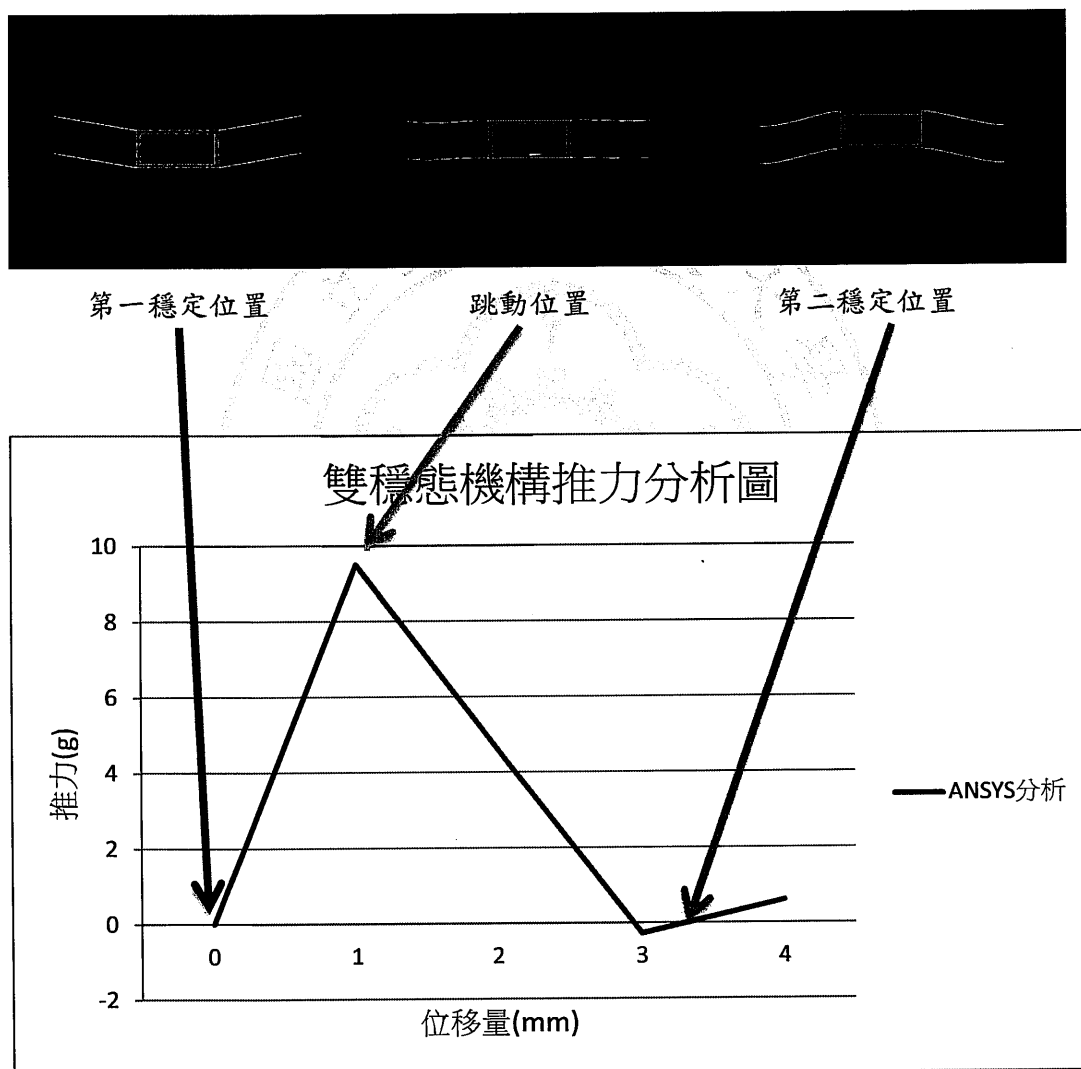


圖 3-13 雙穩態機構推力位移關係圖

表 3-4 雙穩態機構推力位移數據表

位移量(mm)	0	1	2	3	4
推力(g)	0	≒9.5	≒4.61	≒-0.27	≒0.61

### 3.2 電磁鐵結構設計與分析

#### 3.2.1 ANSYS 電磁場分析基本過程

##### 1. 電磁鐵尺寸圖

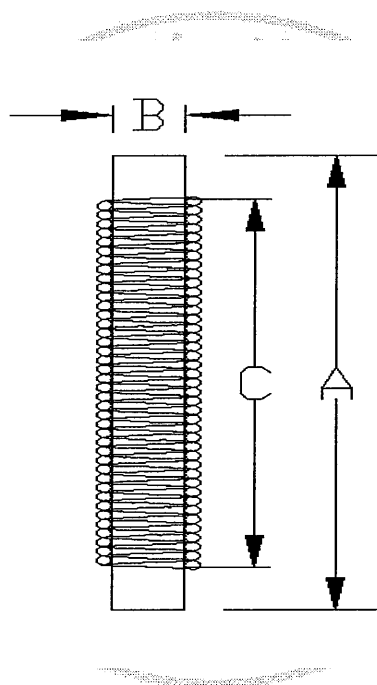


圖 3-14 電磁鐵結構尺寸圖



表 3-5 電磁鐵結構尺寸表

A - 電磁鐵長度	35mm
B - 電磁鐵直徑	Ø3mm
C - 線圈長度	30mm
線圈匝數	90 圈

## 2. 電磁鐵材料性質

表 3-6 電磁鐵材質表

材料	銅	鋼
密度	8930kg/m <sup>3</sup>	7750~8080kg/m <sup>3</sup>
楊氏係數	110GPa	183~213GPa
自由空間導磁率	1.2566290 × 10 <sup>-6</sup> H/m	875 × 10 <sup>-6</sup> H/m

### 3.2.2 電磁場分析步驟

#### (1) 選取元素

在進行分析前，我們首先要選擇電磁分析的元素類型。確保所選擇的元素類型必須支持電磁分析。Plane53元素用來切割鋼棒與漆包線的網格，而Infin110元素則是用來分析空氣的專屬元素，如圖3-15所示。[27]

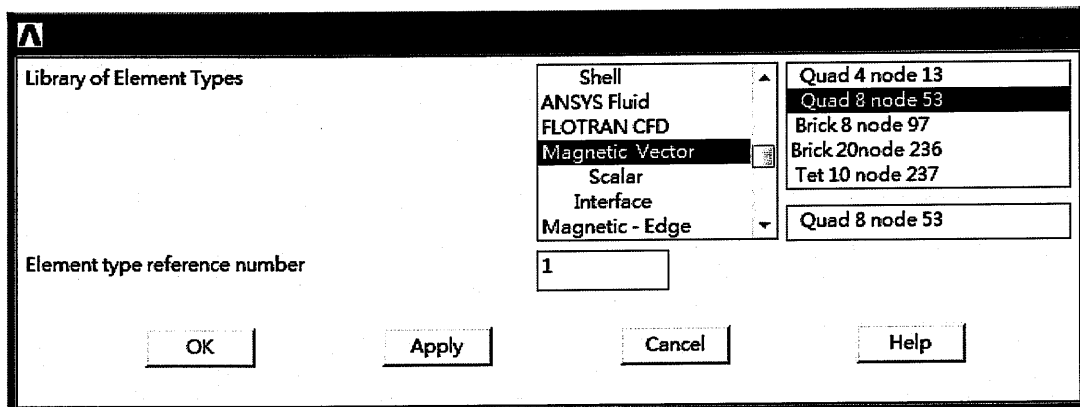


圖 3-15 選取電磁分析元素圖

(2) 輸入材料參數

接著輸入所需要分析材料的電磁參數，導磁率、B-H 曲線。並且要注意到分析的單位一致，如圖 3-16 所示。

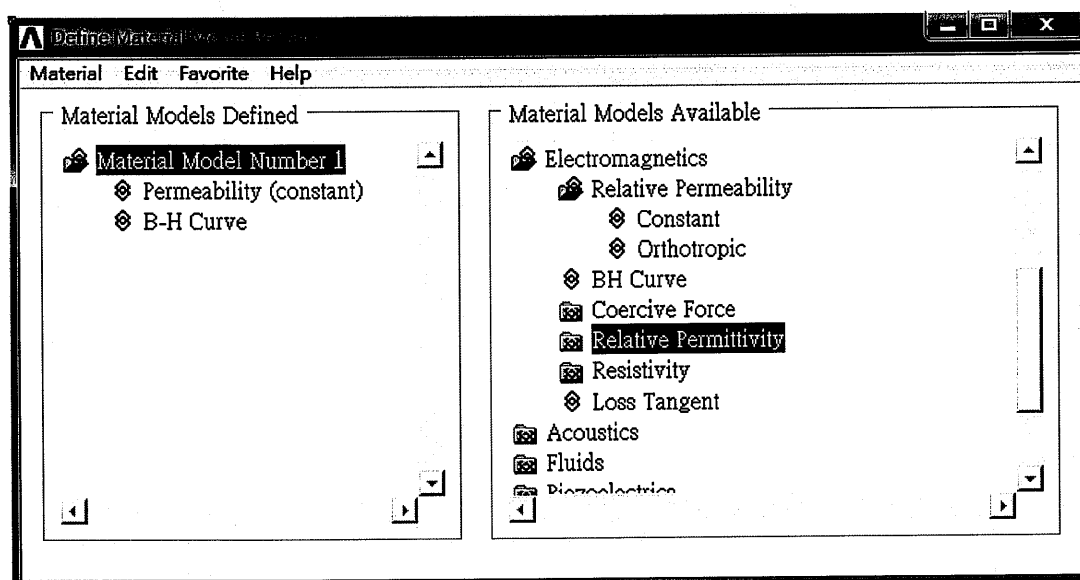


圖 3-16 輸入材料電磁參數圖

### (3) 建立模型

由於鋼棒、漆包線和空氣是屬於不同的元素區塊，所以我們要分別建立出鋼棒、漆包線和空氣的模型，以方便後續可以進行個別的網格切割，並以軸對稱來進行分析，如圖 3-17 所示。

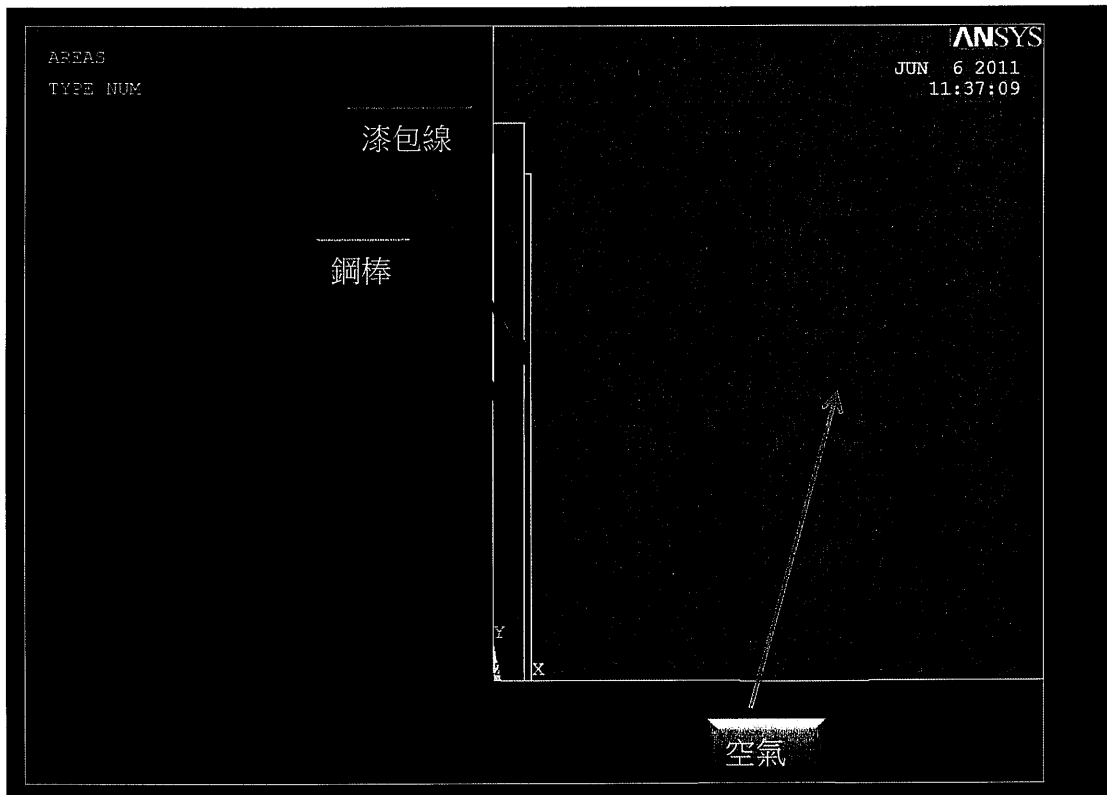


圖 3-17 建立電磁鐵模型圖

#### (4) 劃分網格

分別以Plane53劃分鋼棒與漆包線2D平面網格和Infin110劃分2D平面空氣網格，而網格的密度越密集則精度則是越準確，如圖3-18所示。

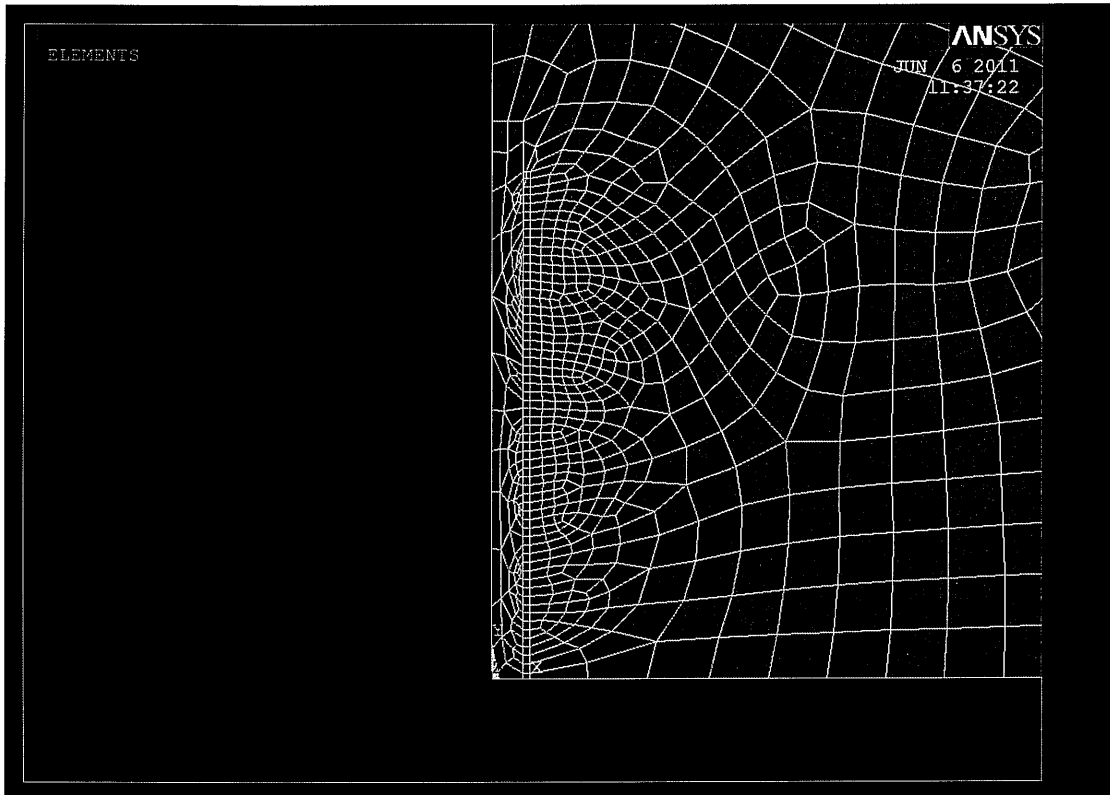


圖 3-18 切割電磁鐵網格圖

(5)施加負載

為了分析電磁鐵處於通電中的情形，因此對漆包線施與電流附載，如圖 3-19 所示。

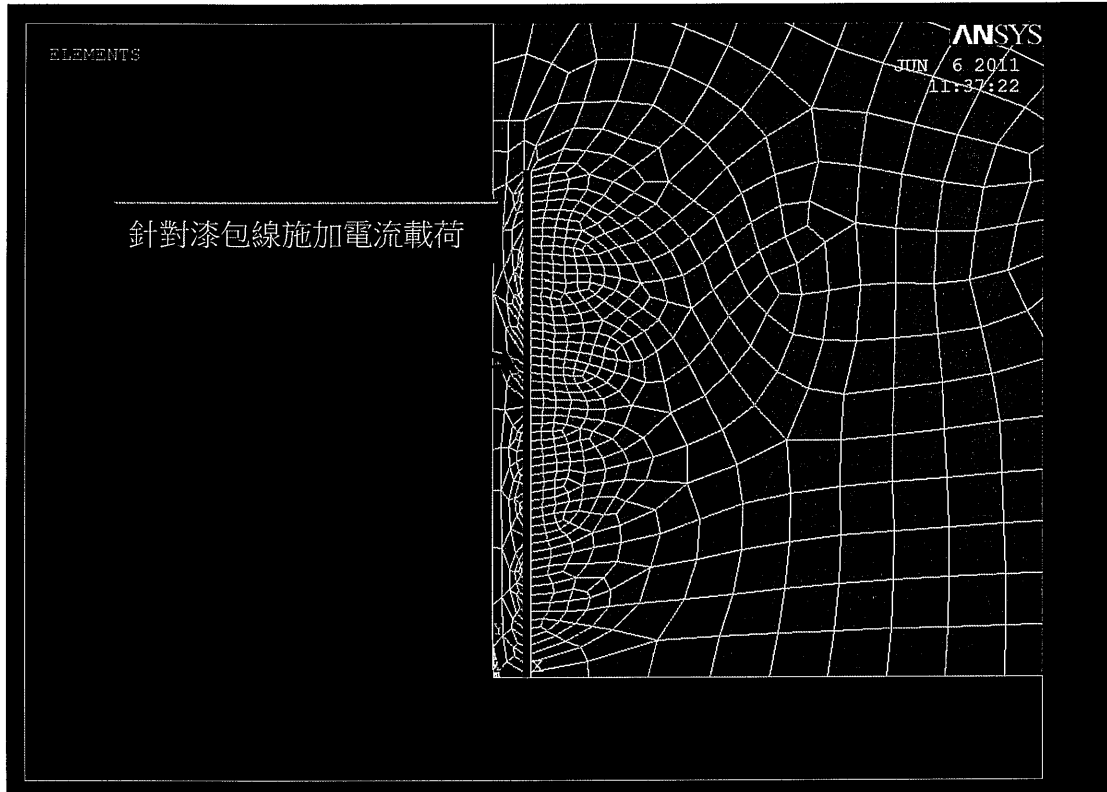


圖 3-19 電磁鐵施加附載圖

## (6)分析結果

### 磁場強度

向量場  $H$  又時常稱為「磁場強度」、「輔助磁場」或是「 $H$  場」。藉由分析的結果可以顯示，在電磁鐵通電之後，電磁鐵外部周圍的所散發的磁場強度範圍大小。

由分析得的結果可以得知電磁鐵在作動時其 2 端的磁力是最強而中間的部分則是磁力最弱的地方，如圖 3-20 所示。[24]

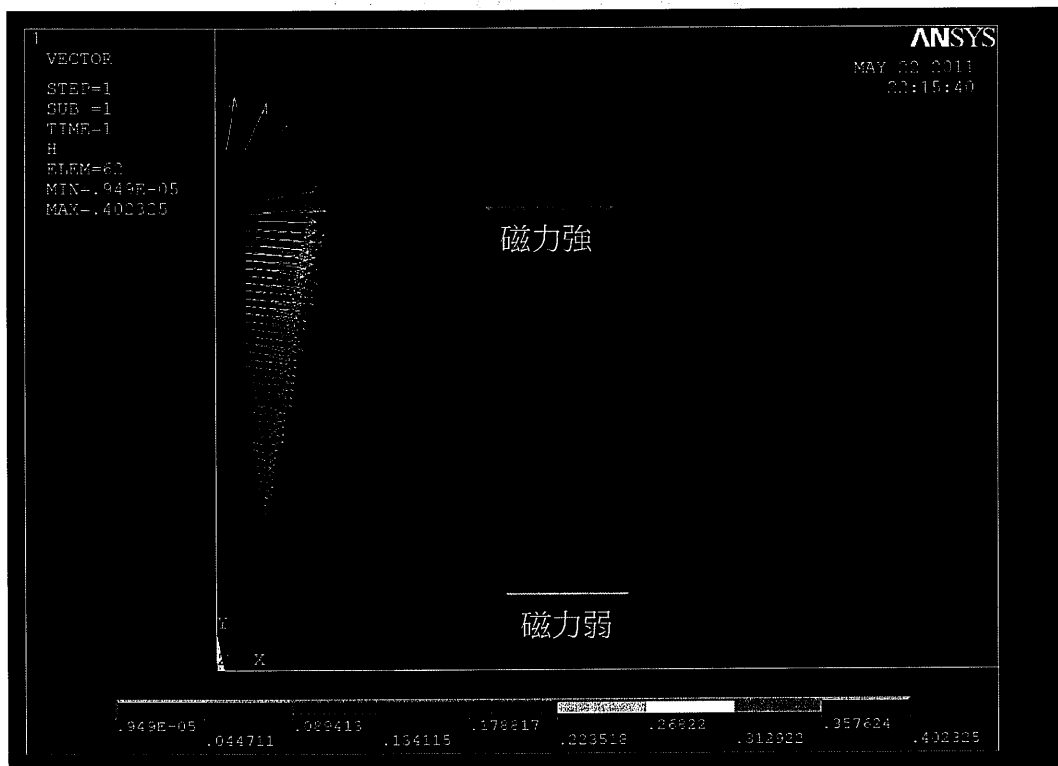


圖 3-20 電磁鐵磁場流量密度分析圖

## 磁通量密度

向量場  $B$  也時常稱為「磁通量密度」(magnetic flux density)、「磁感應強度」(magnetic induction)、「 $B$  場」。藉由分析的結果可以顯示，在電磁鐵通電之後，電磁鐵的導磁物中心內部的磁力密度大小，是一個表示貫穿一個標準面積的磁通量的物理量，如圖 3-21 所示。[24]

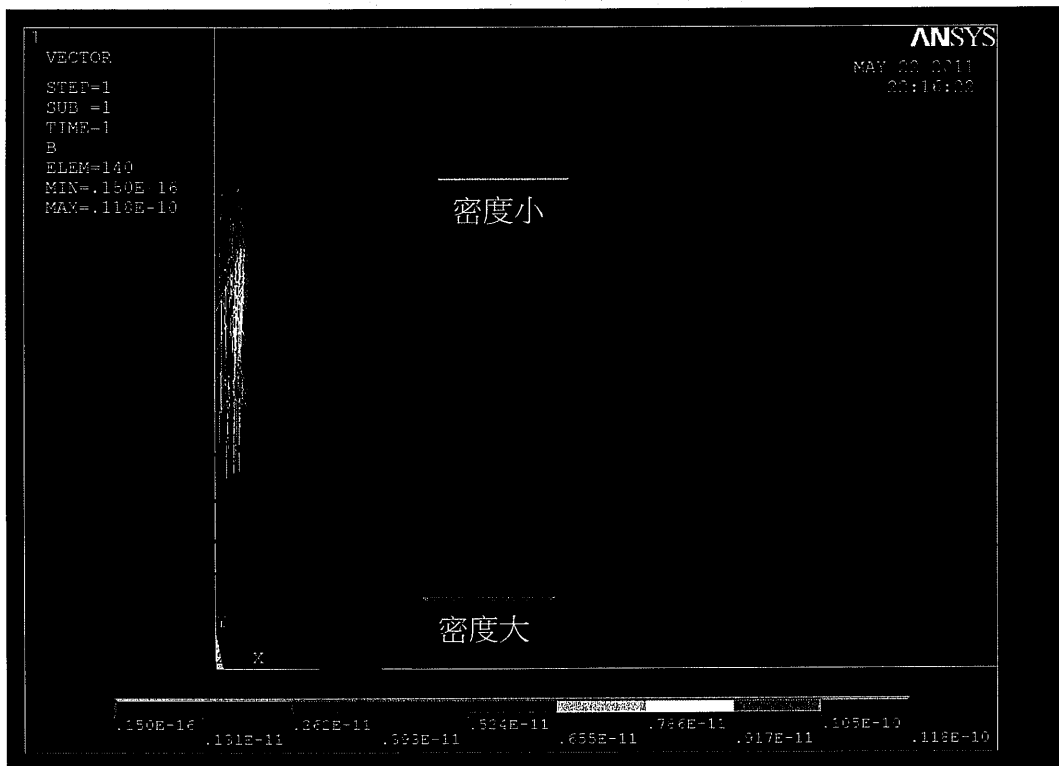


圖 3-21 電磁鐵磁場強度分析圖

## 磁力線

磁場的方向可以藉著磁偶極子的性質來表示；磁場中的磁偶極子會沿著磁場線平行排列，其中的一個顯著例子就是磁鐵周圍的鐵粉分佈圖案。將條狀磁鐵放在白紙下面，鋪灑一堆鐵粉在白紙上面，這些鐵粉會依著磁場線的方向排列，形成一條條的曲線，在曲線的每一點顯示出磁場線的方向，如圖 3-22 所示。[24]

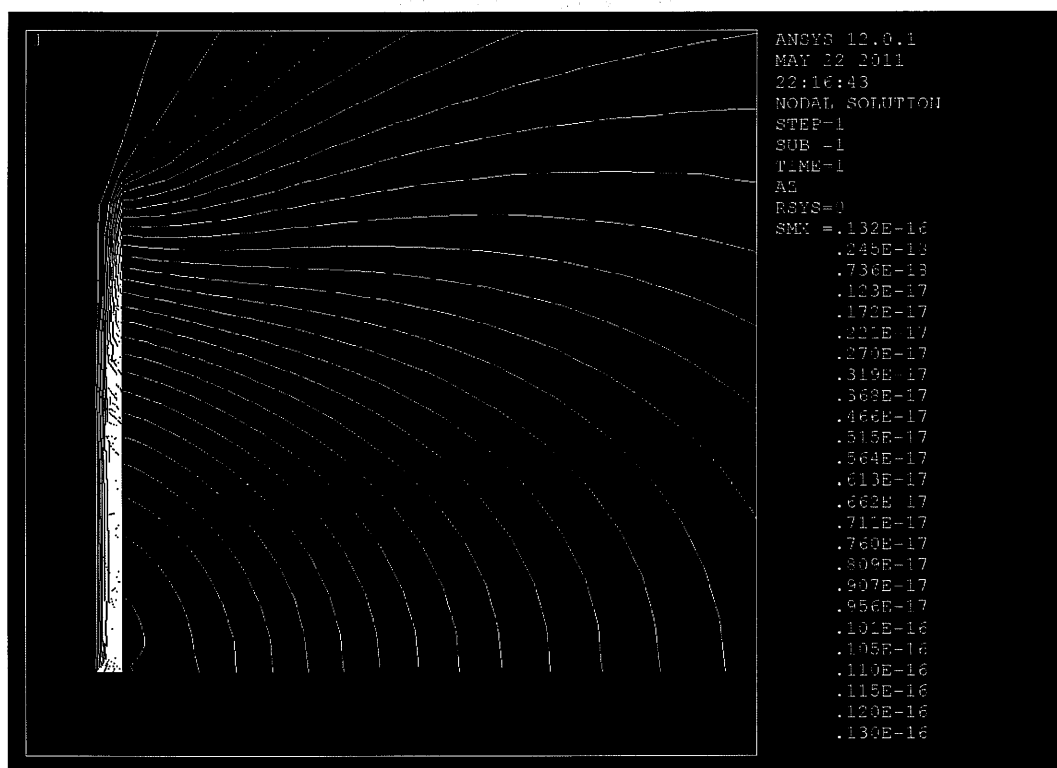


圖 3-22 磁力線分析圖



### 電磁推力分析

藉由 ANSYS 的分析，可以利用磁力公式計算出分析的電磁推力圖。

由圖 3-23 得知，在我們不斷的增加電流，相對的電磁鐵的磁力也是同樣的增加。

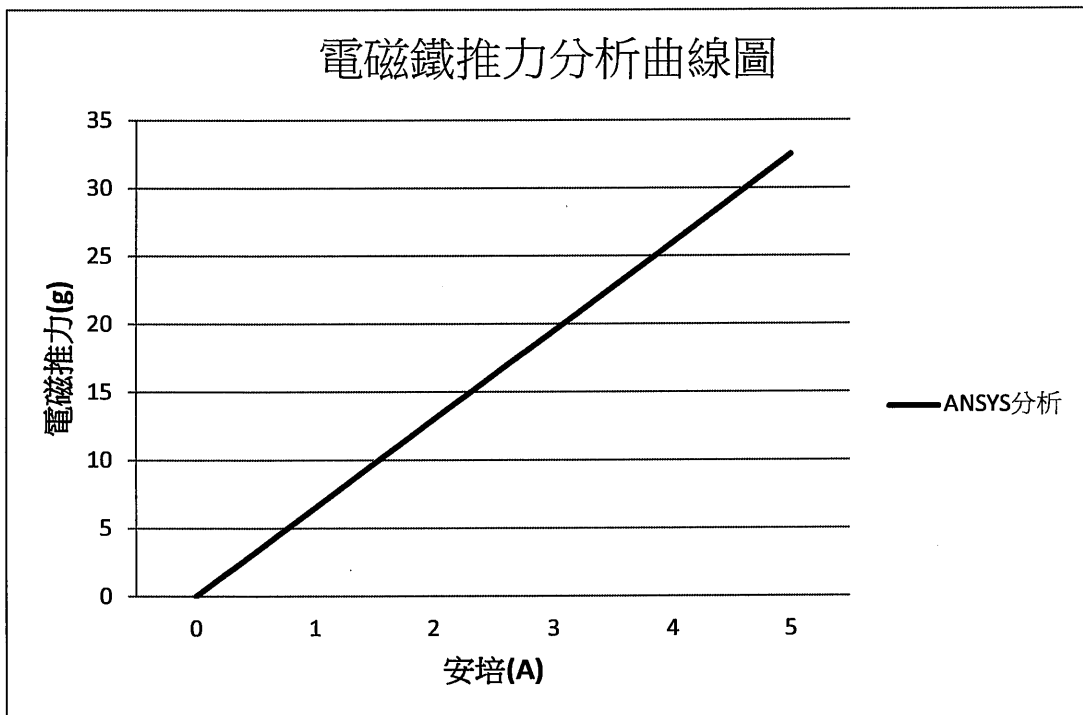


圖 3-23 電磁鐵推力分析曲線圖

表 3-7 電磁鐵推力分析數據表

安培(A)	0	1	2	3	4	5
推力(g)	0	≈6.542	≈13.248	≈19.502	≈26.421	≈32.584

## 第四章 電磁式電斷路器製造

### 4.1 電磁斷路器主體製造步驟

#### 4.1.1 電磁斷路器主體材質

玻璃纖維強化塑膠，簡稱 GRP，也稱作玻璃纖維增強塑料。是一種以高分子環氧樹脂為基體，玻璃纖維或碳纖維等為增強體，經過複合工藝而製成的複合材料。優點包括輕巧，耐腐蝕，抗老化，及絕緣，故用於製造各種運動用具、管道、造船、汽車與電子產品之外殼與印刷電路板，如圖 4-1 所示。

#### 4.1.2 電磁斷路器加工設備

銑床是一種主要用於金屬切削的機床，以銑刀作為刀具加工工件表面這種方法叫做銑削。

銑床用來切削平面，或者用特殊形狀的銑刀銑出成型表面、螺旋槽或齒輪的齒形等。銑削時，工件裝在工作台上或分度頭等附件上，銑刀作旋轉的切削運動，輔以工作台作進給運動。



圖 4-1 電磁斷路器主體圖

表 4-1 電磁斷路器主體資料表

名稱	電磁斷路器主體
材質	塑鋼
尺寸	70 × 50 × 20mm
加工	銑床

## 4.2 雙穩定結構中心元件製造步驟

### 4.2.1 雙穩定結構中心元件主體材質

ABS 樹脂，是一種強度高、韌性好、易於加工成型的熱塑型高分子材料。

ABS 樹脂是微黃色固體，有一定的韌性，密度約為 1.04~1.06 g/cm<sup>3</sup>。它抗酸、鹼、鹽的腐蝕能力比較強，也可在一定程度上耐受有機溶劑溶解。

ABS 樹脂可以在 $-25^{\circ}\text{C}$ ~ $60^{\circ}\text{C}$ 的環境下表現正常，而且有很好的成型性，加工出的產品表面光潔，易於染色和電鍍。因此它可以被用於家電外殼、玩具等日常用品。常見的樂高積木就是 ABS 製品。

聚乙烯，簡稱：PE 是日常生活中最常用的高分子材料之一，大量用於製造塑料袋，塑料薄膜，牛奶桶的產品。

聚乙烯抗多種有機溶劑，抗多種酸鹼腐蝕，但是不抗氧化性酸，例如硝酸。在氧化性環境中聚乙烯會被氧化。

#### 4.2.2 雙穩定結構中心元件加工設備

RP 系統可製作出任意複雜形狀或具細微結構之原型，完全擺脫切削加工之限制，並且克服模型易失真的缺陷，這對製造加工而言是一項重大突破，而在開發研究一種新產品以 RP 為利用之工具，可大大降低經費並縮短時間…等優點，如圖 4-2 所示。

快速成型之製程：當一概念之設計完成於電腦之 3D CAD 軟體後，經一介面程式將此 CAD model 轉成 STL 檔或依不同 RP 機型有不同接受之格式，再經過一 Slicing 軟體計算將 STL 檔轉換成一層一層之 2D 剖面加工程式，再傳入 RP 機器後，工件就被一層一層的加工、堆疊並結合起來，如此一來即可製成 3D 之 Part，如圖 4-3 所示。

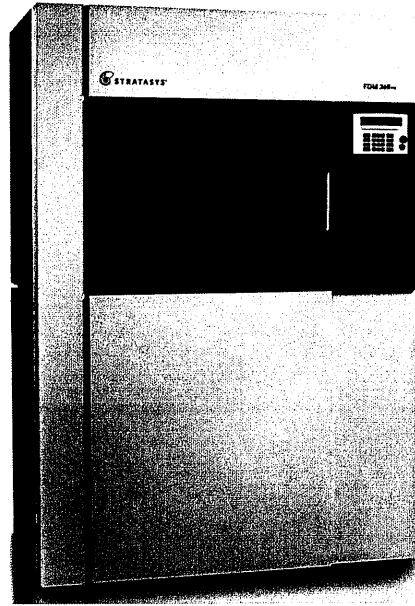


圖 4-2 RP 設備圖

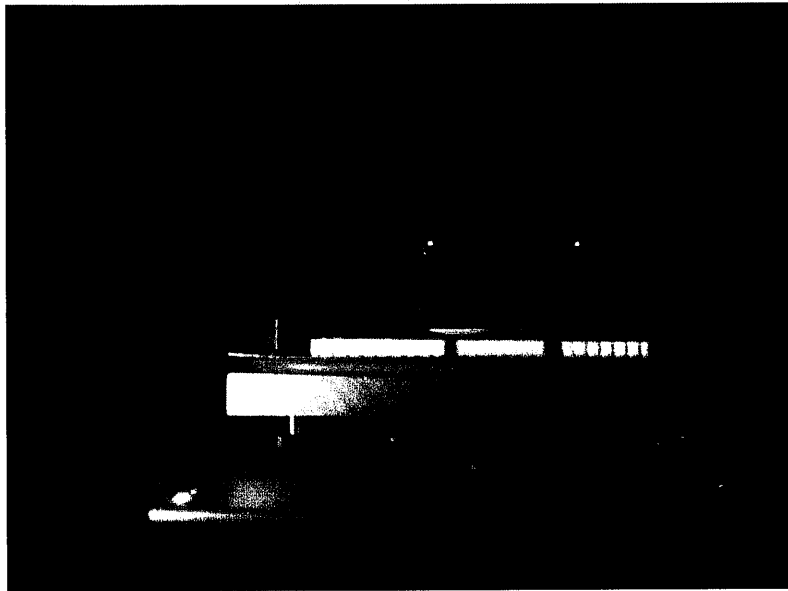


圖 4-3 RP 加工作業圖

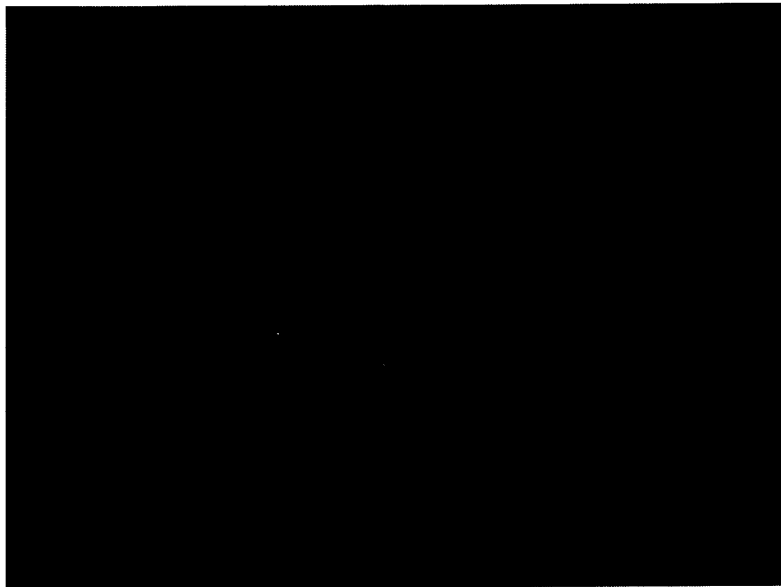


圖 4-4 雙穩定結構中心原件圖

表 4-2 雙穩定結構中心元件資料表

名稱	雙穩定結構中心元件
材質	中心元件 - ABS 樹酯 雙穩態結構 - 聚乙烯塑膠
加工	中心元件 - RP 快速原型機 雙穩態結構 - 聚乙烯板

### 4.3 電磁鐵製造步驟

#### 4.3.1 電磁鐵主體材質

鋼或稱鋼鐵、鋼材，是對含碳量質量百分比介於 0.02%至 2.04%之間的鐵合金的統稱。鋼的化學成分可以有很大變化，只含碳元素的鋼稱為碳素鋼（碳鋼）或普通

鋼；在實際生產中，鋼往往根據用途的不同含有不同的合金元素，比如：錳、鎳、釩等等。

純銅是一種堅韌、柔軟、富有延展性的紫紅色而有光澤的金屬，又被稱為紫銅。1 克的銅可以拉成 3000 米長的細絲，或壓成 10 多平方米幾乎透明的銅箔。純銅的導電性和導熱性很高，僅次於銀，但銅比銀要便宜得多。

銅的顏色很像金，但發紅，水合銅離子的顏色為藍色。金屬銅有一定毒性，因為不易溶解，毒性比可溶性銅鹽弱得多，用特定加工法加工的銅沒有毒。

#### 4.3.2 電磁鐵加工設備

車床是一種將加工物固定在一旋轉主軸上加工的工具機。通常用在圓柱型態的工件加工。一般車床配備各種專用刀具，可完成內外圓加工、鑽孔、車螺紋、切斷車槽、端面加工、車外圓、鑽中心孔、車孔、鉸孔、車圓錐、車成形面、滾花、盤繞彈簧等加工程序，如圖 4-5 所示。

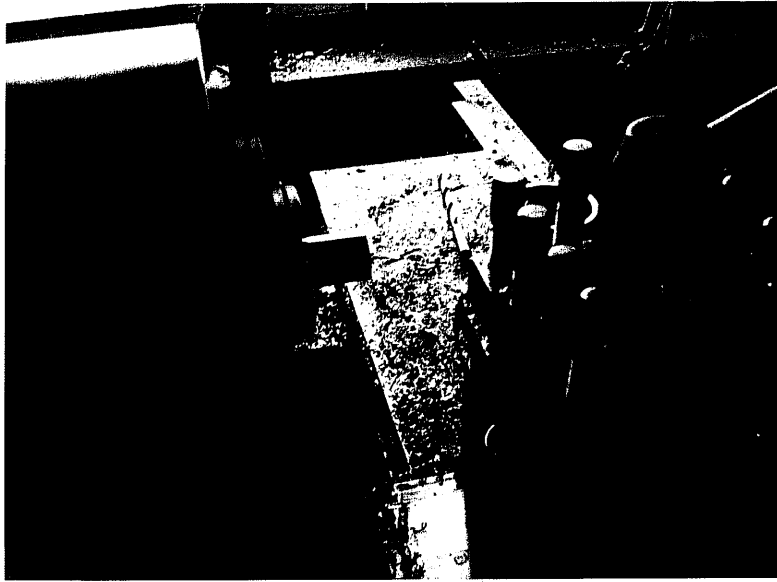


圖 4-5 車床施工圖

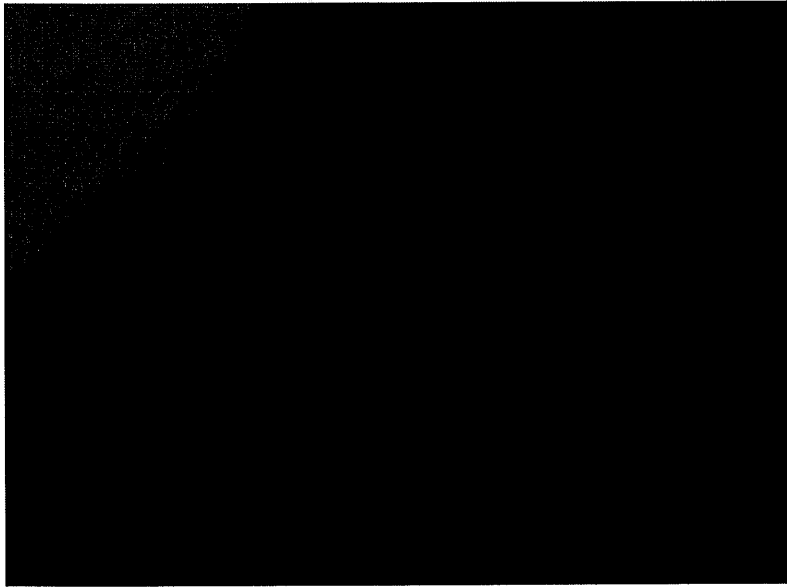


圖 4-6 電磁鐵實體圖



表 4-3 電磁鐵資料表

名稱	電磁鐵
材質	導磁物體 - S25c 鋼 漆包線 - 紅銅 絕緣表層 - 熱縮套管
加工	導磁物體 - 車床車削

#### 4.4 導電連接元件

##### 4.4.1 導電連接元件材質

黃銅是紅銅及鋅的合金。銅含量 62%~68% 的黃銅，其熔點為 934~967 度。黃銅的機械性能和耐磨性能都很好，因此非常適合用於雙穩態結構需要常常摩擦的環境。並且黃銅的導電性非常好，也適用於傳導電流的材質。



圖 4-7 導電連接元件實體圖

表 4-4 導電連接元件資料表

名稱	導電連接元件
材質	黃銅
加工	銅板板金裁切
電阻	0.6 歐姆

#### 4.5 雙穩定機構電磁斷路器

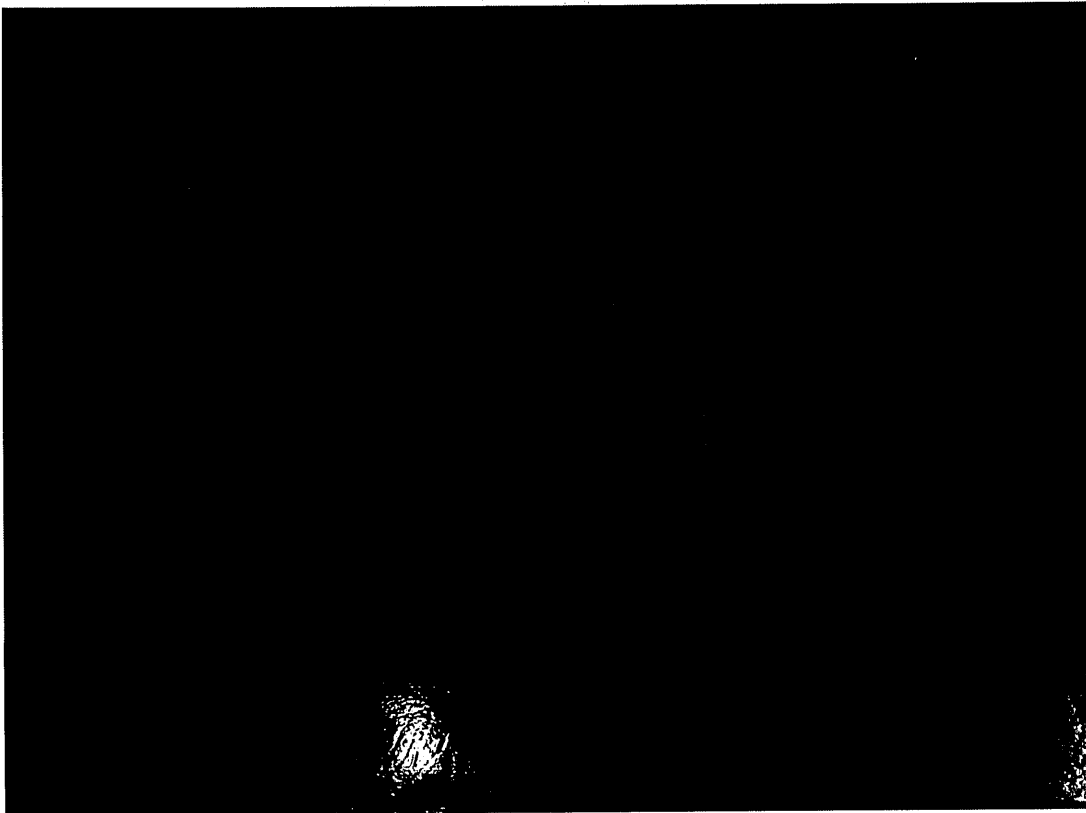


圖 4-8 電磁斷路器實體圖

## 第五章 電磁式電斷路器實驗

### 5.1 實驗分析項目

#### 5.1.1 測試雙穩態機構所需拉力

##### (1) 測試目的

一開始我們先行測量所製造出來的雙穩態機構所需要之拉力，其測量的目的是為了驗證我們藉由 ANSYS 有限元素分析所得到的數據值；藉由測量出來的數值與分析值互相對照比對之後，對於往後之不同設定的設計參數可以有一份參考設計的依據。此舉在設計產品的流程中，不僅是縮短設計的時間也大幅的降低成本。

##### (2) 測試設備

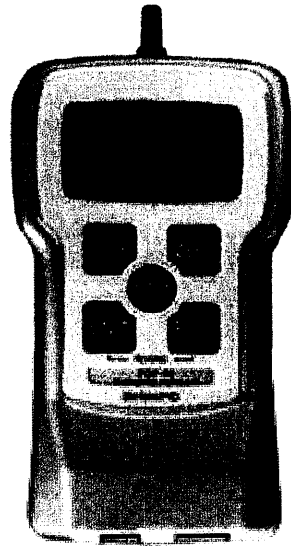


圖 5-1 拉力計儀器圖

### (3) 測試步驟

由於拉力計可以藉有 Excel 軟體的輔助測量，如圖 5-2 所示，所以我們先把數據傳輸線與拉力計和電腦互相連接。再來把拉力計的測量端與雙穩態結構中心部分連結，將上述兩樣物品放置在我們是先繪製好的刻度圖表上；然後由拉力計測量端的移動到每個我們設定的刻度上面，即可以知道雙穩態結構在每一個位移的距離中所需要的拉力多寡，如圖 5-3 所示。

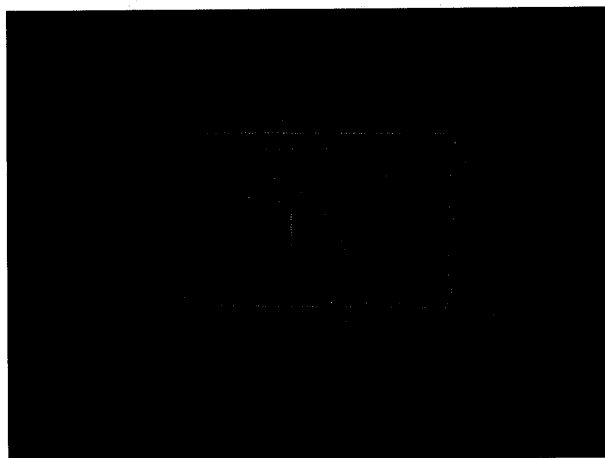


圖 5-2 拉力計軟體介面圖

(4) 測試示意圖

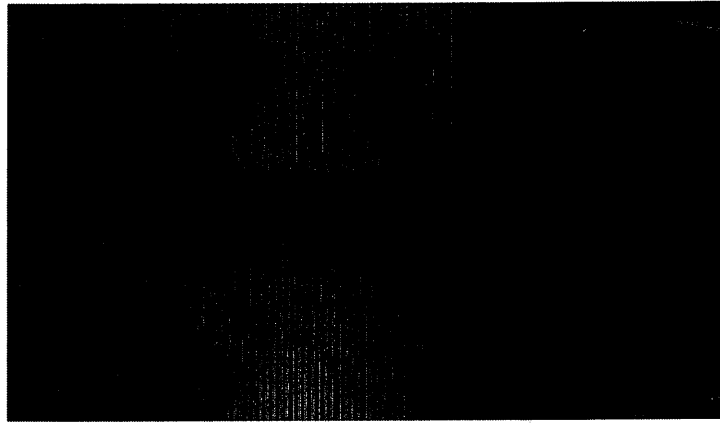


圖 5-3 拉力測試圖

(5) 測試數據圖

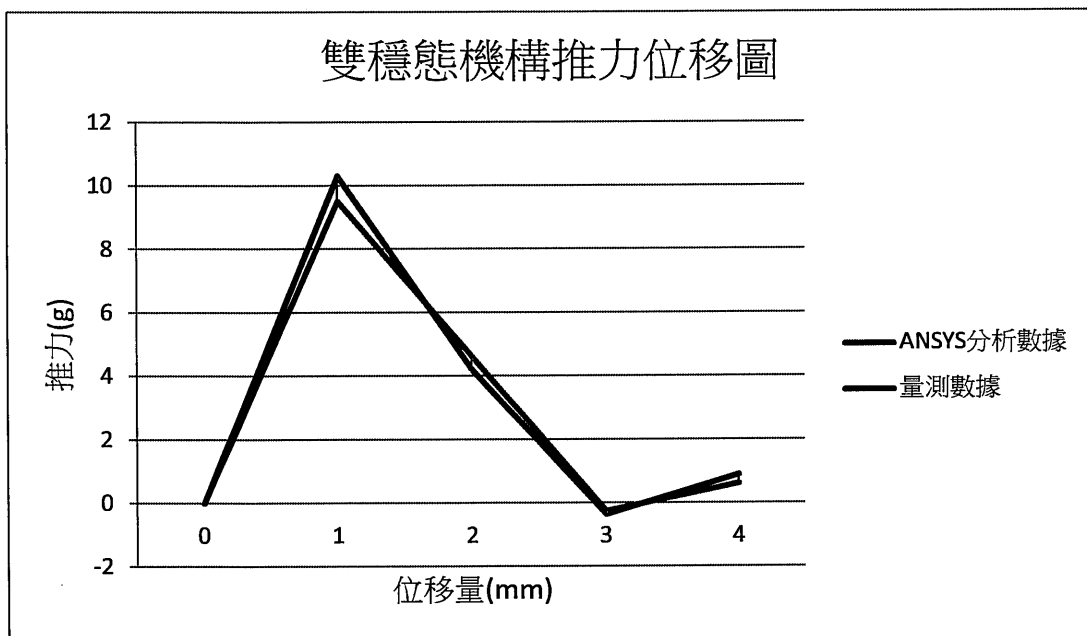


圖 5-4 雙穩態機構推力位移圖

表 5-1 雙穩態機構推力位移數據表

位移量(mm)	0	1	2	3	4
ANSYS 分析數據(g)	0	≐9.5	≐4.61	≐-0.27	≐0.61
量測數據(g)	0	≐10.3	≐4.2	≐-0.36	≐0.89
誤差值(g)	0	0.8	0.41	0.09	0.28

### (6) 測試結果

由實際所量測的數據和藉由 ANSYS 分析數據來互相比較，可以得知 ANSYS 分析的結果與實際測量的數值；所繪製出來的曲線圖走勢是相同的，因此可以確定分析結果是準確的。但由於 ANSYS 所建構的產品，沒辦法達到與實際製造出來的產品完全一樣，但我們還是能藉由一些參數的調整，將一些誤差降到最低，如圖 5-4 所示。

### 5.1.2 測試電磁鐵推力

#### (1) 測試目的

我們測量電磁鐵的推力，其主要目的要驗證我們由 ANSYS 電磁分析的結果與實際測量是否相符合。再與先前我們所測量到的雙穩定機構所需的拉力比較，便可以得知我們所製造出來的電磁鐵是否由足夠的推力來推動雙穩態機構。

## (2) 測試設備

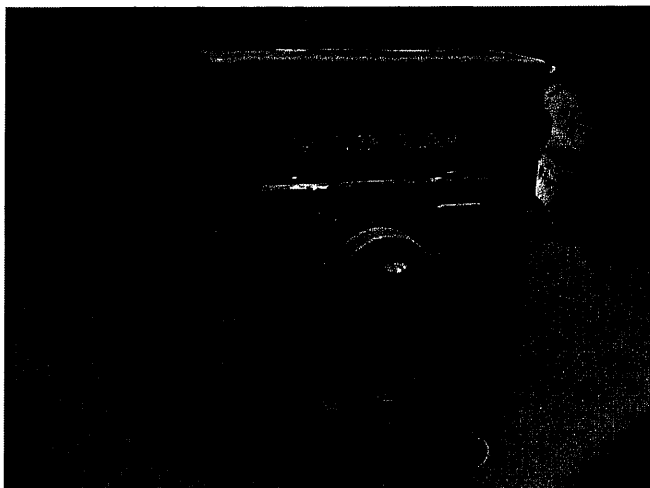


圖 5-5 電源供應器儀器圖

## (3) 測試步驟

由於拉力計可以藉有 Excel 軟體的輔助測量，所以我們先把數據傳輸線與拉力計和電腦互相連接。再來把拉力計的測量端與雙穩定結構中心部分的永久磁鐵互相連結，再把電磁鐵固定在永久磁鐵的磁力排斥方來進行測量。並以 20V 和 0A 為基準接通電源，並且依序地增加電流的大小，來個別的測試出每一個電流值所產生出來的電磁推力大小，如圖 5-6 所示。

(4) 測試示意圖

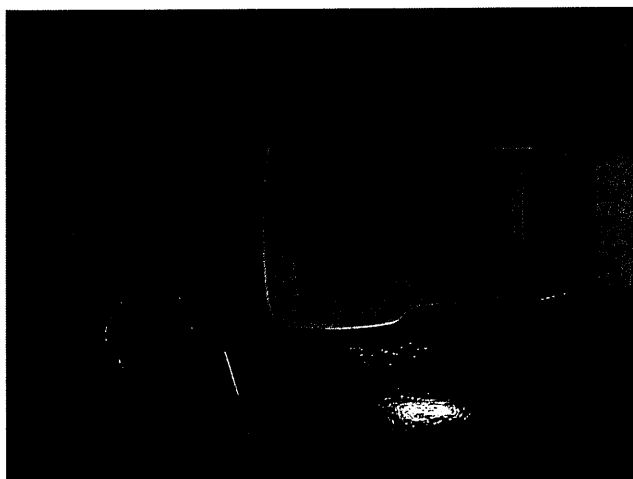


圖 5-6 電磁推力示意圖

(5) 測量數據圖

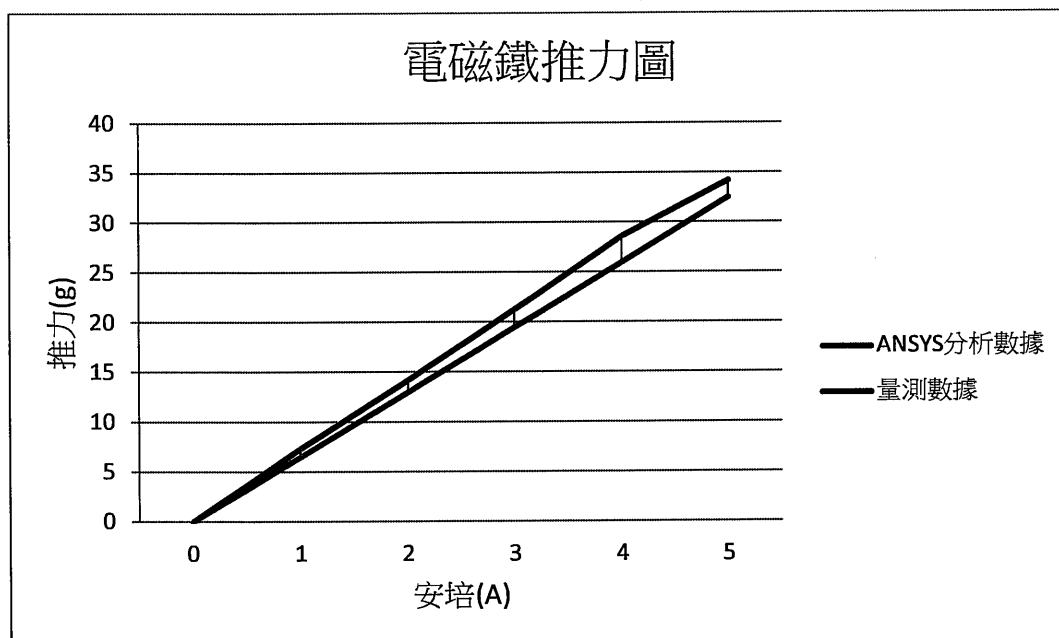


圖 5-7 電磁鐵推力圖



表 5-2 電磁鐵推力數據表

安培(A)	0	1	2	3	4	5
ANSYS 分析數據 (g)	0	≐6.542	≐13.248	≐19.502	≐26.421	≐32.584
量測數據 (g)	0	≐7.35	≐14.21	≐21.38	≐28.62	≐34.26
誤差值 (g)	0	0.808	0.962	1.878	2.199	1.676

### (6) 測試結果

藉由量測電磁推力數據和 ANSYS 所分析出來的數據的比較，可以得知 ANSYS 分析的結果與實際電磁推力的數值；所繪製出來的曲線圖走勢是相同的，因此可以確定分析結果是準確的。但由於 ANSYS 所建構的產品，沒辦法達到與實際製造出來的產品完全一樣，但我們還是能藉由一些參數的調整，將一些誤差降到最低，如圖 5-7 所示。

### 5.1.3 測試電磁鐵作動溫度圖

#### (1) 測試目的

此測試主要目的在於當電磁式斷路器在運作的時候，其內部元件電磁鐵的溫度會提升多少幅度。

#### (2) 測量設備

表 5-4 間隙加壓數據表

安培(A)	0	1	2
距離(mm)	1.5	3.2	4.8

#### (6)測試結果

由測量的結果可以得知，加大電磁鐵與永久磁鐵之間間隙距離，確實是可以控制我們所需要的安全電流值。由於電磁鐵磁力有一定的距離範圍，所以當我們把電磁式電斷路器微型化的時候是可以改善這個問題的，如圖 5-13 所示。

#### 5.1.5 電磁斷路器功能性測試

##### (1)實驗目的

為了測量雙穩態結構電磁式電斷路器是否可以達到我們所要求的功能，我們在電磁式電斷路器線路後連接一組燈泡。當電流處於我們所設定的安全範圍值內則電燈泡則是會持續的發亮，若超過安全範圍值的話電磁式電斷路器便會發生作用，自行斷電以保護燈泡。

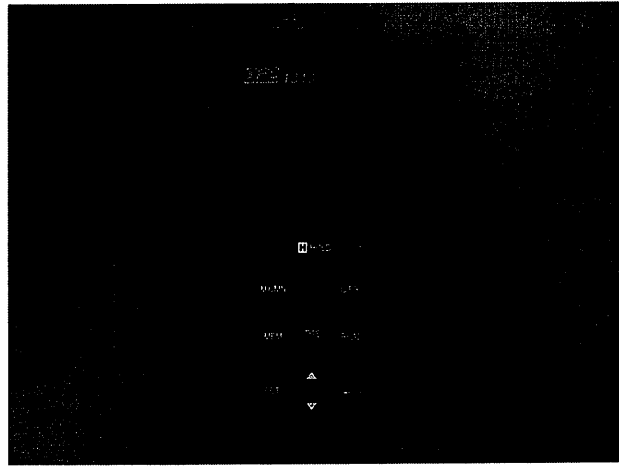


圖 5-8 溫度表儀器圖

(3) 測量步驟

先將電源供應器連接至電磁鐵，並將溫度測量線與電磁鐵互相接觸。以常溫  $29^{\circ}\text{C}$  和電源供應器 20V0A 為基準開始進行測量，如圖 5-9 所示。

(4) 測量示意圖

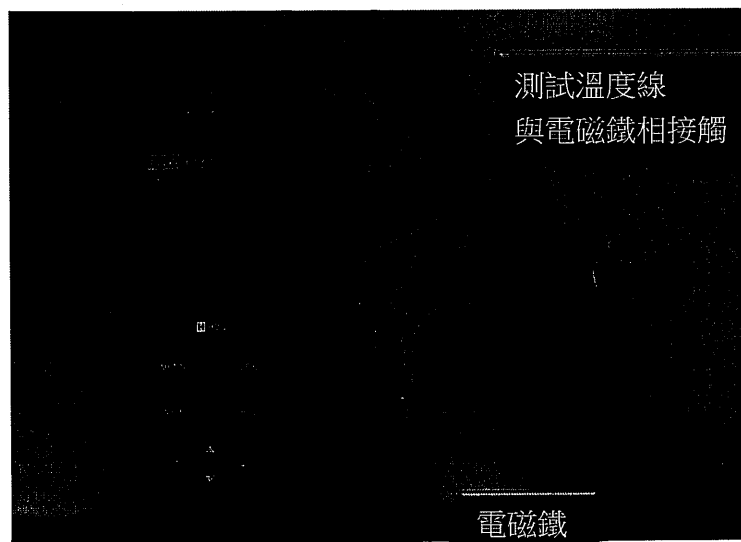


圖 5-9 電磁鐵測試溫度示意圖

(5) 測試數據圖

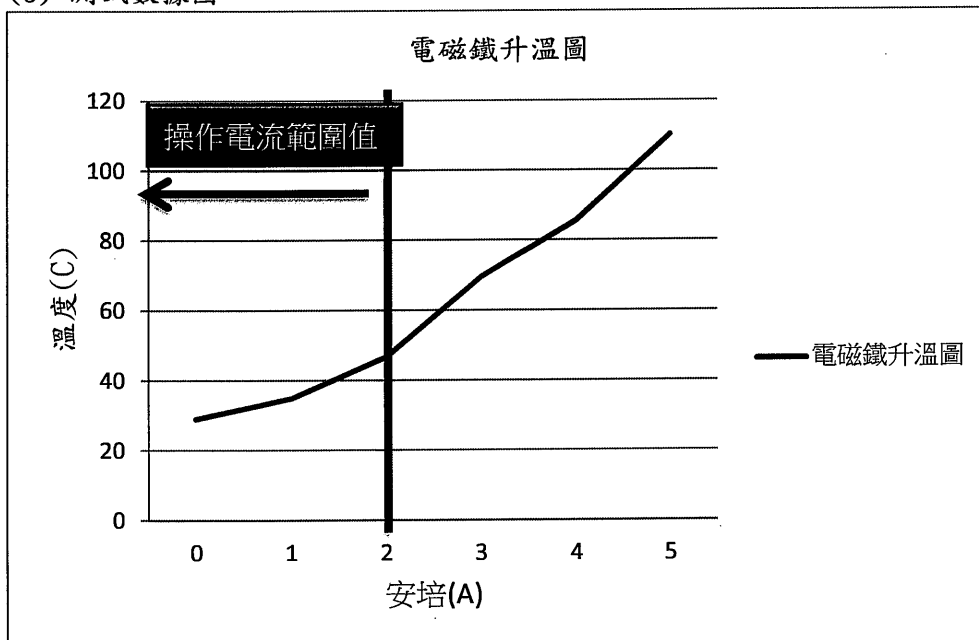


圖 5-10 電磁鐵升溫圖

表 5-3 電磁鐵升溫數據表

安培(A)	0	1	2	3	4	5
溫度(°C)	29	≈34.9	≈46.7	≈69.5	≈85.6	≈110.2

(6) 測試結果

藉由測試的結果可以發現，當電磁鐵在正常運作時的溫度並不會影響到斷路器的功能。即使是超過安全電流範圍值也是不會影響到斷路器的安全。而溫度跳動的範圍大約在 5°C 左右，如圖 5-10 所示。

#### 5.1.4 測試間隙加壓推力

##### (1) 測量目的

我們之所以測試間隙加壓推力，是為了讓我們可以再多一種參數可以來控制電流安全值的一種方法。由於磁力是隨著距離的增長而減弱，因此我們便利用了這一個特性；藉由控制間隙距離的長短，來設定我們電磁式電斷路器的安全電流值。

##### (2) 測量設備

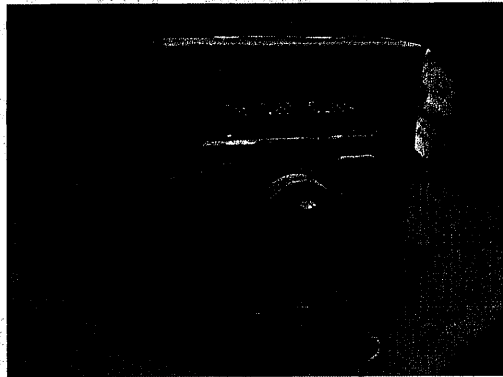


圖 5-11 電流供應器儀器圖

##### (3) 測量步驟

首先我們先把電源供應器之正負極電源輸出線，連接在電磁式電斷路器上。並且移動電磁鐵使電磁鐵與永久磁鐵中有一間隙距離，並且反覆測量出該間隙距離所需的最低電流值，如圖 5-12 所示。

(4) 測量示意圖

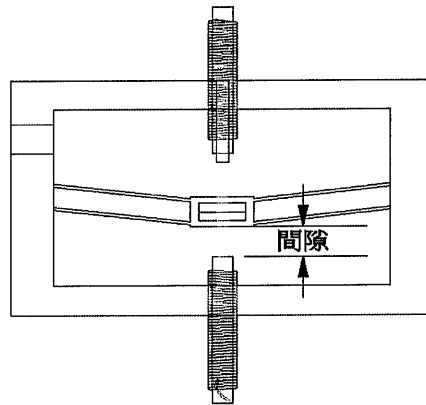


圖 5-12 測量間隙加壓示意圖

(5) 測量數據圖

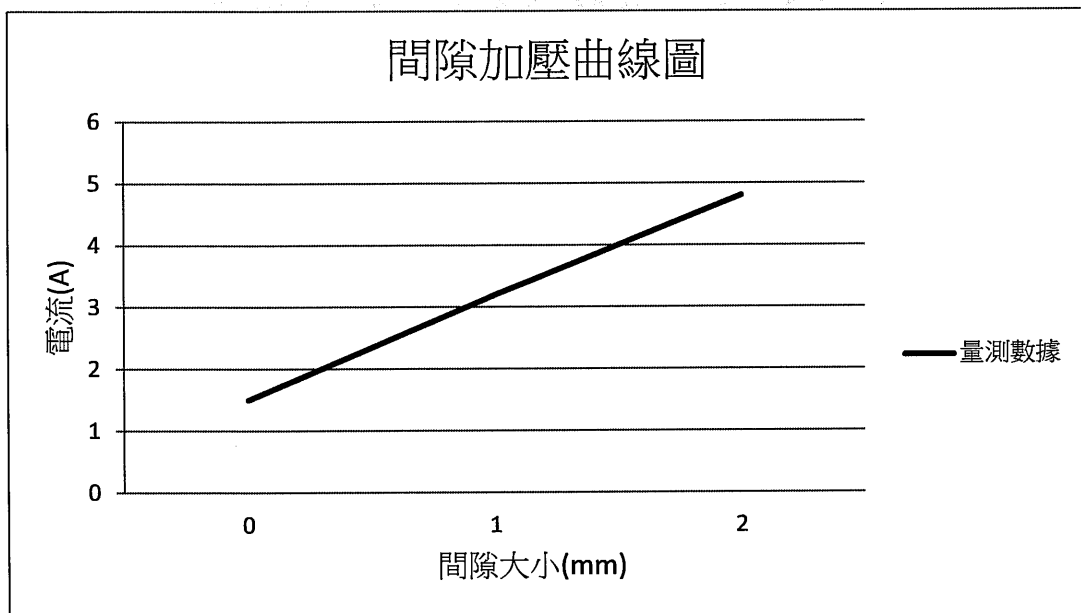


圖 5-13 間隙加壓曲線圖

## (2) 實驗設備

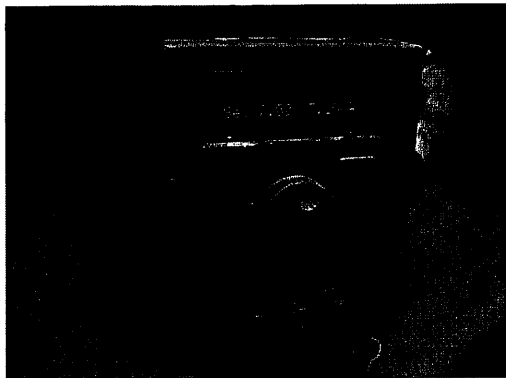


圖 5-14 電流供應器儀器圖

## (3) 實驗步驟

我們以電源供應器當作平常輸出電流的工具。將電源供應器的輸出裝置接於我們所製作的電磁式電斷路器，並在電磁式電斷路器線路後面連接了數個小電燈泡，並且以以 20V 和 0A 當為基本測試數值並且開始測試。在測試的同時慢慢的增加電流大小，直到雙穩態機構達到斷電效果為止，如圖 5-15 所示。

(4) 實驗示意圖

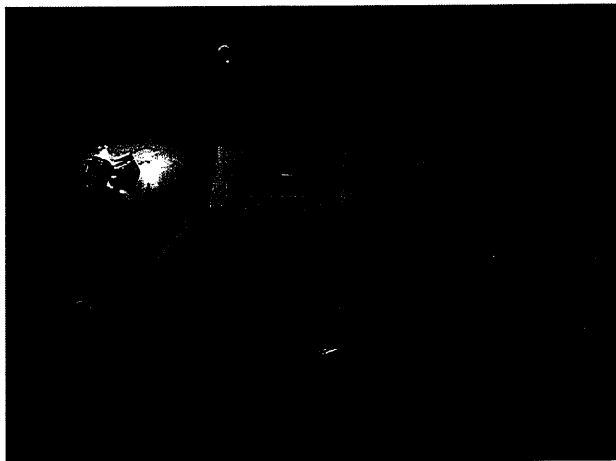


圖 5-15 電磁式電斷路器功能測試圖

(5) 實驗數據圖

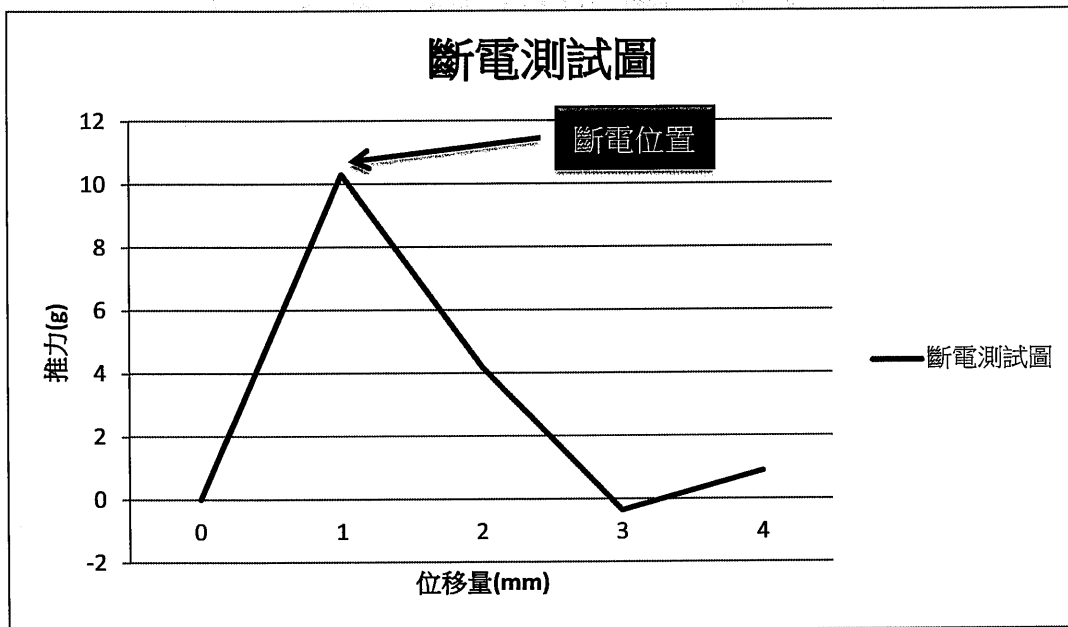


圖 5-16 實驗數據說明圖



## (6) 實驗結果

實驗中在開啟電源的同時逐漸的增加電源供應器的電壓，直至電磁鐵所產生的電磁力大於雙穩態機構的反作用力。而大於反作用力的位置，為雙穩態機構的位移量約 1mm 之間。當超過此位移量時便會使作動元件 (contact latch) 從通電中的第一穩態位置跳動到第二穩態位置以達到斷電的效果。而由實際的測試結果發現到，當電源供應器的電流逐漸增加 1.5A 到時，便可以使作動元件(contact latch) 從第 1 穩態位置跳到第 2 穩態位置。並且達到正常斷電的效果，如圖 5-16 所示。

### 5.1.6 電磁式電斷路器斷復電測試

#### (1) 實驗目的

此實驗目的在測試當電磁式電斷路器在發生短路或者是電流爆衝時，利用我們另外一邊的電磁鐵實施電磁式電斷路器復電的動作。

#### (2) 實驗設備

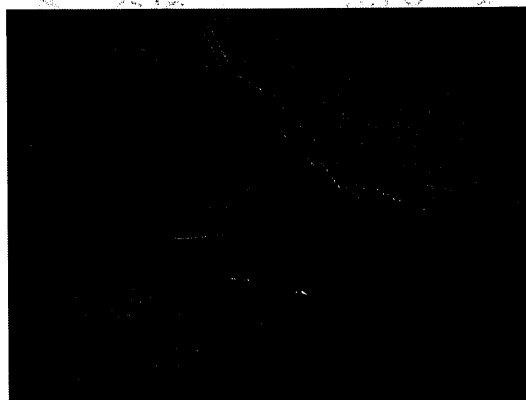


圖 5-17 電源切換器

### (3) 實驗步驟

我們以電源供應器當作平常輸出電流的工具。將電源供應器的輸出裝置接於我們所製作的電源切換器，並由電源切換器連接電磁式電斷路器。在實驗中我們故意使電流過大導致斷路器自動斷電，再來測試斷路器的復電功能，如圖 5-18 所示。

### (4) 測試示意圖

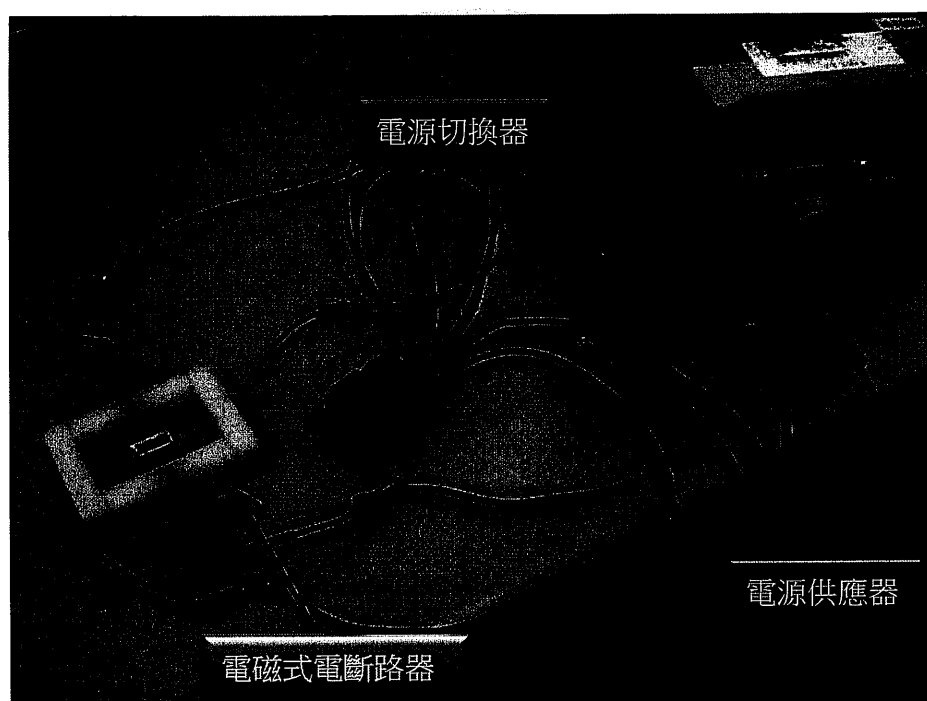


圖 5-18 復電功能測試圖

### (5) 實驗結果

在電流超出安全電流值時，當雙穩定結構便會以不到一秒的時間跳動到第二穩定位置。這時我們藉由電源切換器把電流切換到另一邊的電磁鐵，便會迅速的把雙穩定機構歸位到原始位置，以達到復電供電的效果。

## 第六章 結論

### 6.1 結果與討論

我們由實驗驗證後，ANSYS 有限元素分析可以在製造之前就可以知道元件的功能性；可以預先知道一些可能出現的問題，並且提早解決降低設計所犯的錯誤。不僅可以降低設計開發的時間，更可以減少大量的開發成本。

由實驗的結果發現，在正常的電源供應情況下，電流中所產生的短暫的電流爆衝（surge）所造成電磁力並不足夠讓電磁式電斷路器的作動原件移動。

由實驗的過程當中，可以得知電磁式電斷路器確實可以在超過設定之安全電流值下達到保護電路的功能。

雙穩態結構擁有兩個自我穩定平衡狀態是在開發電磁式電斷路器裡是一個非常好的設計要素，在任一個穩定狀態位置不需有電源供應來維持。

斷路器只要改變電磁鐵或雙穩態機構等的設計參數，就可以設計一系列的斷路器，用於不同安全電流值下的運作。

該電磁式電斷路器不但可以自動且在不需冷卻下毫不延遲的恢復電路供電。

而周遭環境的溫度也不會影響到斷路器的正常運作。

## 6.2 未來工作

本研究所需要的改進目標與未來研究的方向為：

1. 由於雙穩定機構可以很容易的微型化，所以可以藉由 MEMS 的技術，將雙穩定機構製造於晶片上面。
2. 由於現在的磁力受限於導體的導磁性，因此以後藉由超導體的製造成本降低，而採用超導體材料來大幅改善提升磁力。
3. 以本論文的雙穩定電磁斷路器做實際的量產測試。
4. 就由本論文的分析結果設計出一系列的雙穩態電磁式電斷路器。



## 參 考 文 獻

- [1] 維基百科
- [2] 田民波，2001，磁性材料，清華大學出版社
- [3] 楊國輝、廖淑慧，2000，應用電磁學，五南圖書出版股份有限公司
- [4] Hansen B. J., Carron C. J., Jensen B. D., Hawkins A. R., Schultz S. M., Plastic latching accelerometer based on bistable compliant mechanisms, Smart Mater. Struct. 16(2007)1967-1972.
- [5] Brian B Cherry, Larry L Howell, Brian D Jensen, "Evaluating three-dimensional effects on the behavior of compliant bistable micromechanisms", et al 2008 J. Micromech. Microeng. 18 095001
- [6] Howell L., Compliant Mechanisms, Wiley-IEEE, 2001.
- [7] Wilcox D.L. and Howell L. L., "Fully Compliant Tensural Bistable Micromechanisms (FTBM)," Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 14, no. 6, pp. 1223 - 1235, 2005.  
[Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2005.859089>
- [8] Barth J., Krevet B., and Kohl M., "A bistable SMA microactuator with large work output", Transducers (2009), pp. 41 - 44.
- [9] Gerson Y., Krylov S. and Ilic B., "Electrothermal Bistability Tuning in a Large Displacement Micro Actuator," Journal of Micromechanics and Microengineering, 20, page 112001, 2010.
- [10] D.-A. Wang, H.-T. Pham, Y.-H. Hsieh, 2009, "Dynamical switching of

an electromagnetically driven compliant bistable mechanism “, *Sensors and Actuators A: Physical*, Jan 2009, v. 149, pp. 143-151. (SCI)

[11] Huy-Tuan Pham, Dung-An Wang, 2011, “ A constant-force bistable mechanism for force regulation and overload protection “, *Mechanism and Machine Theory*, July 2011, v. 46, n. 7, pp. 899-909. (SCI)

[12] Huy-Tuan Pham, Dung-An Wang, 2011, ” A quadristable compliant mechanism with a bistable structure embedded in a surrounding beam structure” , *Sensors and Actuators A: Physical*, June 2011, v. 167, n. 2, pp. 438-448. (SCI)

[13] Han J.S., Muller C., Wallrabe U. and Korvink J.G., 2007, ” Design, Simulation, and Fabrication of a Quad-stable Monolithic Mechanism with X- and Y-Directional Bistable Curved Beams” , *ASME J. Mech. Des.*, 129, pp.1198-1203.

[14] Qiu J., Lang J.H., Slocum A.H., ” A curved-beam bistable mechanism” , *Journal of Microelectromechanical Systems* 13 (2004) 137-146

[15] 張朝暉，2009，ANSYS 12.0 結構分析工程應用實例解析 第三版，機械工業出版社

[16] Maxwell J. C., 1892. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, London,

[17] Dahari Z., Vinay T., Sood D., 2005 , “Mems electromagnetic micro relays overview and design considerations” , *IIUM Engineering Journal*, Vol. 6, No. 2

- [18] Jonathan W. Wittwer Baker S., and Larry Howell L., Robust Design and model Validation of Nonlinear Compliant Micromechanism.
- [19] Brian D., Jensen Matthew B., Parkinson KatsuoKurabayashi Larry L. Howell Michael S. Baker
- [20] Design Optimization Of A Fully-Compliant Bistable Micro-Mechanism
- [21] 賴俊傑、鄭博泰，2009，適用於低壓直流片電系統之固態式斷路器設計與實現，國立清華大學。
- [22] 阮柏村、周至如，2004，以有限元素法分析 GIS 斷路器之起斷特性及開關突波特性，中原大學
- [23] 黃思倫、李翔儒，2008，應用斷路器電弧模型於斷路器起斷之暫態行為分析，逢甲大學
- [24] 楊博勳、張仲卿，2009，以磁力控制磁粉之快速鞋底模型系統，國立台南大學
- [25] 周昌翰、陳美勇，2008，以電磁驅動之二為高精度定位平台設計與控制，國立臺灣師範大學
- [26] 郭銀景，2004，電磁兼容原理及應用教程，清華大學出版社
- [27] 林清涼、戴念祖，2004，電磁學：宏觀電磁學、光學和狹義相對論，五南圖書出版股份有限公司
- [28] 唐興倫、范群波、張朝暉、李春陽，2003，ANSYS 工程應用教程-熱與電磁學篇，中國鐵道出版社