

國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程

碩士論文

複合式讀卡機之疲勞失效分析與可靠度評估



Fatigue Analysis and Reliability Assessment of
Hybrid Card Reader

研究生：張耀文

指導教授：金大仁博士

中華民國九十五年四月

複合式讀卡機之疲勞失效分析與可靠度評估

Fatigue Analysis and Reliability Assessment of

Hybrid Card Reader

研究生：張耀文

Student : Yao-Wen Chang

指導教授：金大仁博士

Advisor : Dr.Tai-Yan Kam

國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程



A Thesis

Submitted to Degree Program of Automation and Precision Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Automation and Precision Engineering

April 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十五年 四月

複合式讀卡機之疲勞失效分析與可靠度評估

研究生：張耀文

指導教授：金大仁博士

國立交通大學工學院精密與自動化工程學程

中文摘要

本文目的在於研究複合式讀卡機的疲勞失效模式及其效應，推斷容易引起失效的零件，然後建立三種不同破壞準則探討零件疲勞壽命的可靠度。研究過程中，首先瞭解複合式讀卡機之作動要點、功能及機構特色，建立作動流程與可靠度方塊圖，藉由失效模式與效應分析探討複合式讀卡機的元件，分析低層次組件失效對較高層次系統的影響，並推斷容易引起疲勞失效的零件，再依據零件材料之疲勞應力，建構三種破壞準則即「疲勞應力小於工作應力振幅」、「安全因數小於 1」、「工作應力點與 Goodman 失效面的距離小於 0」，並藉此建立極限狀態方程式，再利用 first order second moment 方法計算可靠度指標 β 值，並研究各參數之變異程度對零件疲勞壽命之可靠度影響。文中說明如何計算各種破壞準則的可靠度，並分析何種破壞準則計算可得到較保守之可靠度指標 β 值，進一步分析零件各設計參數對可靠度之敏感度分析，於敏感度分析結果之中，可選擇高敏感度參數作為設計、製造、進料檢驗重點以生產高可靠度低成本之零件。

關鍵詞：複合式讀卡機、破壞準則、失效模式與效應分析、可靠度指標 β 值

Fatigue Analysis and Reliability Assessment of Hybrid Card Reader

Student : Yao-Wen Chang

Advisors : Dr.Tai-Yan Kam

Master Degree Program of Automation and Precision Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The purpose of this paper is to study the failure of the critical components of the hybrid card reader using the failure mode and effects analysis (FMEA). In the failure analysis, three different failure criteria are used to study the fatigue life reliability of the components. In the analysis process, after reviewing the operational conditions, functions and mechanism characteristics of the hybrid card reader, the operational procedure and reliability related diagrams are constructed. The FMEA is used to analyze the components' failure effects to study how they can affect the reliability of the system and determine which components are easier to fail. The fatigue life reliabilities of the components are computed by using the three different failure criteria, namely, stress-strength criterion, safety factor, and Goodman failure criterion. The limit state equations derived from the corresponding failure criteria are used in the reliability analysis of the components. The first order second moment method is used to calculate the reliability index β and study how the component parameters' variances affect the fatigue life reliability of the component. The results obtained in this study can identify the failure criterion which produces the lowest reliability. In the sensitivity analysis, the effects of the component's design parameters on fatigue reliability are investigated. The results can help identify the key factors important to the design, manufacturing and inspection of components with higher reliability and lower cost.

Key Words: hybrid card reader, FMEA, failure criteria, reliability index β

誌謝

本文承蒙指導教授金大仁博士的悉心指導與耐心教誨方能順利完成，在此致上由衷謝意。

在這三年多的學習與研究過程中，感謝偉芬學姐、昌毅與于昇學長的協助，以及崧任、建郎、維成、加融、慶博、欣翰學弟與實驗室所有成員一起奮鬥與勉勵，更感謝學生任職之同亨科技股份有限公司之主管：張永銘總經理、劉健郎副總經理、滕萬生副總經理、孫思厚協理、蔡明相協理等於進修期間的關懷，並能夠以公司的產品做為實驗研究對象，才使得研究工作得以順利進行，希望以此研究成果應用於公司的設計工作、導入可靠度觀念於產品設計，並且提供給設計驗證部門之可靠度測試參考，以減少設計變更改數與可靠度驗證時間，使產品順利量產。

最後要感謝父母親、岳父母、辛苦的老婆 淑華、弟弟、弟媳、妹妹、妹夫給我的支持與鼓勵，以及小兒軒銘與凱傑的乖巧用功，使能在工作之餘能夠心無掛慮的完成學業取得學位。僅以此文獻給所有關心與愛護我的人。



目 錄

中文摘要	.....	i
英文摘要	.....	ii
誌謝	.....	iii
目錄	.....	iv
表目錄	.....	vi
圖目錄	.....	viii
符號說明	.....	x
一、	緒論	1
1.1	前言	1
1.2	研究背景與動機	2
1.3	文獻回顧	3
1.4	本文研究方向	4
二、	複合式讀卡機之介紹	5
2.1	卡片之規格、基本結構與特徵	5
2.2	複合式讀卡機之架構與零件組成	7
2.3	複合式讀卡機之作動流程	7
2.4	影響複合式讀卡機之主要因素	8
2.4.1	構造組成	8
2.4.2	操作方式	9
2.4.3	零件材料	10
2.5	讀取頭裝置之回位彈簧	10
2.5.1	彈簧特性	11
2.5.2	彈簧材料	11
2.6	IC卡讀取頭	12
2.6.1	端子	12
2.6.2	滑動磨耗	14
2.6.3	表面處理	15
三、	複合式讀卡機之失效分析	17
3.1	失效模式與效應分析	17
3.2	失效分析	29
3.2.1	彈簧失效	29
3.2.2	磨損	30

3.2.3	疲勞與 S-N 曲線	31
3.2.4	鬆弛	32
3.2.5	卡片失效	33
3.2.6	複合式讀卡機之失效的處理方式與潛在問題	34
四、	可靠度分析方法	35
4.1	強度—應力干涉理論	35
4.2	力矩近似法	39
4.3	常態分佈函數	41
五、	力學分析	44
5.1	彈簧常數	44
5.2	理論計算分析	45
5.3	分析結果	47
六、	實驗與可靠度評估	48
6.1	前言	48
6.2	破壞準則	48
6.3	實驗數據與計算分析	50
6.4	可靠度分析	64
6.5	可靠度設計	66
6.6	敏感度分析	67
七、	結論與未來工作	69
	參考文獻	71
	附錄	73



表 目 錄

表 1	ISO 7811 卡片規格表	5
表 2	IC 卡的端子功能	6
表 3	磁條卡與 IC 卡之比較	7
表 4	基座金屬電性與機械特性	14
表 5	危害性指數評定類別及建議處理準則	19
表 6	複合式讀卡機組件失效之嚴重等級	19
表 7	複合式讀卡機零組件與編號	20
表 8	FMEA - 塑膠構架	20
表 9	FMEA - 左/右機架	20
表 10	FMEA - 機架螺絲	21
表 11	FMEA - 偵測桿	21
表 12	FMEA - 定位銷 1	21
表 13	FMEA - 壓縮彈簧	22
表 14	FMEA - 微動開關 2 組合	22
表 15	FMEA - 螺絲 1	22
表 16	FMEA - 磁頭組合	23
表 17	FMEA - 圓錐螺旋彈簧	23
表 18	FMEA - 定位銷 2	23
表 19	FMEA - 定位銷 3	24
表 20	FMEA - 螺絲 2	24
表 21	FMEA - IC 卡讀取頭組合	24
表 22	FMEA - 拉伸彈簧 1	25
表 23	FMEA - 電磁閥	25
表 24	FMEA - 連桿組 1	25
表 25	FMEA - 連桿組 2	26
表 26	FMEA - 連桿定位銷	26
表 27	FMEA - 拉伸彈簧 2	26
表 28	FMEA - 歸位桿	27
表 29	FMEA - 扣環	27
表 30	FMEA - 介面電路板螺絲	27
表 31	FMEA - 電子零件、連接器、電路板	28
表 32	複合式讀卡機 FMEA 結果-1	28

表 33	複合式讀卡機 FMEA 結果-2	29
表 34	拉伸彈簧相關參數之平均值與標準差	73
表 35	IC 卡讀取頭端子相關參數之平均值與標準差	73
表 36	拉伸彈簧的三種破壞準則之 β 值與性能函數對設計參數之敏感度	74
表 37	拉伸彈簧的三種破壞準則取不同標準差之 β 值	74
表 38	IC 卡讀取頭端子的三種破壞準則之 β 值與性能函數對設計參數之 敏感度	74
表 39	IC 卡讀取頭端子的三種破壞準則取不同標準差之 β 值	75
表 40	可靠度 0.9999 並取不同標準差之彈簧線徑 d	75
表 41	可靠度 0.9999 並取不同標準差之彈簧平均螺旋直徑 D	75
表 42	可靠度 0.9999 並取不同標準差之 IC 卡讀取頭端子板厚 h	76
表 43	可靠度 0.9999 並取不同標準差之 IC 卡讀取頭端子懸臂長 l	76
表 44	拉伸彈簧的三種破壞準則之 β 值的敏感度分析	76
表 45	IC 卡讀取頭端子的三種破壞準則之 β 值的敏感度分析	76



圖目錄

圖 1	磁條卡之磁條位置	77
圖 2	IC 卡的端子位置	77
圖 3	IC 卡的基本結構	77
圖 4	卡片與複合式讀卡機	78
圖 5	塑膠構架	79
圖 6	左機架	79
圖 7	右機架	79
圖 8	卡片偵測裝置	80
圖 9	介面電路板	80
圖 10	微動開關 2 組合	81
圖 11	磁卡之磁頭裝置	81
圖 12	IC 卡之讀取頭裝置	82
圖 13	電磁閥裝置	82
圖 14	偵測桿施力於卡片的方向、卡片與微動開關 2 的接觸定點	83
圖 15-1	IC 卡與讀取頭裝置之靜態連結	83
圖 15-2	IC 卡與讀取頭裝置之靜態連結	84
圖 16	磁條卡與磁頭裝置	84
圖 17	複合式讀卡機之作動流程	85
圖 18	複合式讀卡機之組件爆炸圖	86
圖 19	IC 卡讀取頭的端子	86
圖 20	IC 卡讀取頭端子的讀卡之受力狀況	87
圖 21	複合式讀卡機之可靠度方塊圖	88
圖 22	S-N 曲線	89
圖 23	交變應力之特性	89
圖 24	應力鬆弛現象	89
圖 25	應力與強度分佈之分析	90
圖 26	強度 X 與應力 Y 之分佈 -1	90
圖 27	強度 X 與應力 Y 之分佈 -2	91
圖 28	強度 X 與應力 Y 之分佈 -3	91
圖 29	強度 X 與應力 Y 之分佈 -4	91
圖 30	極限狀態方程式 $g(X) = 0$	92
圖 31	IC 卡讀取頭端子之彈簧常數 K 值量測	92

圖 32	IC 卡讀取頭端子之實驗的彈簧常數 K 值	93
圖 33	IC 卡與讀取頭端子連結之後的相關位置和作用力	93
圖 34	IC 卡之彈簧常數 K 值量測	94
圖 35	IC 卡之實驗的彈簧常數 K 值	94
圖 36	簡支樑承受集中負荷的變位	95
圖 37	拉伸彈簧之規格	95
圖 38	疲勞剪應力與工作剪應力振幅之示意圖	95
圖 39	IC 卡讀取頭端子之規格	96
圖 40	拉伸彈簧的工作應力點接近斷裂線或塑性變形線之安全因數	96
圖 41	IC 卡讀取頭端子工作應力點接近斷裂線或塑性變形線之安全因數	97
圖 42	拉伸彈簧的工作應力點與 Goodman 失效面之距離	97
圖 43	IC 卡讀取頭端子的工作應力點與 Goodman 失效面之距離	97
圖 44	拉伸彈簧之彈簧常數 K 值量測	98
圖 45	拉伸彈簧之實驗的彈簧常數 K 值	98
圖 46	拉伸彈簧的拉伸試片尺寸	99
圖 47	拉伸彈簧的拉伸試片與夾具	99
圖 48	拉伸彈簧試片的拉伸試驗曲線	99
圖 49	IC 卡讀取頭端子的拉伸試片尺寸	100
圖 50	IC 卡讀取頭端子的拉伸試片	100
圖 51	IC 卡讀取頭端子試片的拉伸試驗曲線	100
圖 52	不同材料的疲勞限應力與抗拉強度的比值	101
圖 53	已知拉伸彈簧工作應力點，求平均剪應力為 0 之等壽命剪應力振幅	101
圖 54	已知 IC 卡讀取頭端子工作應力點，求平均彎曲應力為 0 之等壽命彎曲應力振幅	101
圖 55	拉伸彈簧的三種破壞準則取不同標準差之 β 值	102
圖 56	IC 卡讀取頭端子的三種破壞準則取不同標準差之 β 值	102
圖 57	可靠度 0.9999 之彈簧線徑 d	103
圖 58	可靠度 0.9999 之彈簧平均螺旋直徑 D	103
圖 59	可靠度 0.9999 之 IC 卡讀取頭端子板厚 h	104
圖 60	可靠度 0.9999 之 IC 卡讀取頭端子懸臂長 l	104

符號說明

R_s :	串聯系統可靠度
U :	應變能
B :	負載，荷重
δ :	變形量，拉伸量，變位
C :	每單位接觸面積所移除的材料重量
Q :	移除的材料重量
A :	接觸面積
L :	滑動距離
S :	應力
N :	疲勞壽命
$f(t)$:	機率密度函數
$F(t)$:	累積分佈函數
$R(t)$:	可靠度函數
$f_{X,Y}(x,y)$:	X 與 Y 之聯合機率密度函數
F :	失效機率
R :	可靠度
β :	可靠度指標
$\Phi(*)$:	標準常態累積分佈函數
$g(X)$:	性能函數
P_s :	可靠度
$E[X]$:	期望值
$Var[X]$:	變異數
σ :	隨機變數之樣本的標準差
μ :	隨機變數之樣本的平均值
n :	彈簧螺旋有效圈數
d :	彈簧線徑
D :	彈簧之平均螺旋直徑
G :	剪彈性係數，橫彈性係數
K :	彈簧常數
k :	瓦爾的應力修正係數
c :	彈簧指數
τ :	剪應力



l :	懸臂長
E :	楊氏係數，縱彈性係數
I :	樑之斷面二次矩
S :	彎曲應力
M :	彎矩
y :	到中立軸的距離
b :	板寬
h :	板厚
S_{ult} :	抗拉強度
S_{yp} :	降伏應力
S_e :	疲勞限應力
S_a :	應力振幅
S_m :	平均應力
τ_{su} :	抗剪強度
τ_{yp} :	剪降伏強度
τ_e :	疲勞限剪應力
τ_a :	剪應力振幅
τ_m :	平均剪應力
F_S :	安全因素
H :	工作應力點與 Goodman 失效面的距離



一、緒論

1.1 前言

自 1920 年第一張記錄用卡片上市至今[1]，全球已發行十億張以上的卡片，廣泛地使用在日常生活中，而若把日常最常接觸的電話卡及停車、乘車磁卡等等估算，其使用數量更不記其數。但是此種磁條卡只能儲存簡單的安全碼，只要一台讀卡機，任何人都能讀取其資料，也能重編程式，所以容易發生盜刷、側錄、偽卡氾濫的事件，其安全性甚低。

IC 卡(或稱晶片卡、智慧卡)在全世界最早是由日本人有村國孝於 1970 年發明，專利第 940548，此記載於特公昭 53-6491 號中。專利申請日為 1970 年 3 月 3 日，專利權是由申請日開始，到第二十年的 1990 年 3 月 3 日為止[2]。IC 卡是目前所知安全性最佳的儲存媒體，就像一張裝了微型電腦的卡片，較能防止持卡人的資料被盜用，是比磁條卡更安全的支付工具。此因其單晶片作業系統對於儲存每一筆資料均有嚴格的存取控制，而且可以提供加密演算，將訊息直接傳入 IC 卡中運算，密鑰完全閉鎖在晶片之中，不會洩漏到晶片之外。但是晶片價格高昂，因而無法普及，近年來由於晶圓代工價格逐漸下滑，使得 IC 卡的製造成本大幅降低，加上網際網路興起帶動電子商務的發達，IC 卡具有的高保密性與安全性再度受到重視。目前使用 IC 卡之最大問題在於資訊平台和管理系統等尚未完全普及化，所以 IC 卡與磁條卡將會並存好一段時間。

上述兩種卡片均各需有專用之讀取裝置，而具有整合兩種卡片讀取功能之複合式讀卡機提供了最佳的解決方案，但必須能滿足下列要求：磁條卡採動態刷動以磁頭讀取磁條上之資料，而 IC 卡採用讀取頭與卡片之端子做靜態連結，不致因相互滑動接觸造成摩擦磨損而減短使用壽命甚至於無法使用。平均一張 IC 卡的使用壽命可讀取 10 萬次，在可靠耐用性上更非磁條卡得以比擬。IC 卡接點機構設計之重點是 IC 卡插入讀卡機於接觸時機構帶動之連接裝置，其使用壽命需達 50 萬次以上[3]。因此在機構設計時，不可僅以一般連接器的接觸方式來思考，而必須具有所謂 Landing 的功能，才不致因磨損而無法使用。因此對複合式讀卡機做失效分析與可靠度評估是值得研究的課題。

1.2 研究背景與動機

隨著科技發達使人類在交易支付方式，從遠古時代之貝殼，演進至錢幣，再進入現今及未來的塑膠貨幣的盛行，均是由於金融自動化所帶來之便利。在交易自動化的結果，將可減少處理成本，以及降低偽幣風險。只要有人類的地方即有交易的存在，而金融交易自動化的趨勢是不可避免之人類演進的過程。

在金融交易自動化當中，讀卡機扮演很重要的交易介面角色，舉凡自動櫃員機(ATM)、轉帳繳款櫃員機 (Kiosk)、Point-Of-Sale (POS) 機、加油機、公用電話、數位電視機上盒等等，都可看到讀卡機的廣泛應用實例。因此讀卡機對於塑膠貨幣之普及化佔有很重要地位。複合式讀卡機能讀取磁條卡與 IC 卡的資料，這可以提供更多元化的附加服務，預期未來可望逐漸蔚為市場的發展潮流。台灣 IC 卡市場發展至今，總發卡量直逼三千萬張大關，在政府政策推動與民間商業行為雙重影響下，基礎建設正逐步建置，而讀卡機之可靠度，將無庸置疑是整個卡片產業發展的重要因素之一，也是讀卡機產業的核心競爭力，其研發不只是創造新產品與創新應用模式，同時也在改善設計及保證產品的可靠性。若在產品設計初期便對未來可能遇到的問題進行分析，設計產品較能符合各階段工程的要求，減少後期設計變更的次數，藉此縮短研發時程增加獲利。

可靠度是產品品質的要素，因此產品可靠度的良窳將直接影響產品的品質與競爭力。可靠度評估的重點為量化發生失效的機率，而評估過程中最重要的工作在於元件失效機率的決定。所以必需收集許多元件的資訊，諸如失效時間、壽命等。並分析失效原因以利採取對策，並應用合適的方法來修正在單純環境狀況下所獲得之失效率並建立一系統性的方法來評估複合式讀卡機的可靠度，此對於塑膠貨幣的發展有重要影響。

亞太區智慧卡協會(APSCA) 表示，2005 年的智慧卡博覽會將加入台灣通訊、金融、交通與身份認證四大領域的智慧卡應用實際案例，象徵國內智慧卡應用在逐步落實後，邁向應用整合的領域前進。台灣的智慧卡應用在全球可說是相當特殊案例，進度也遠比多數國家快速，進三年來包括健保、金融、交通與認證等應用逐漸到位，已成為全球矚目焦點。整合現有的 IC 卡應用，透過跨產業整合，創造出更便利的 IC 卡使用環境，由此

也再再顯示讀卡機的未來龐大商機。

1.3 文獻回顧

就本文主題，在許多有關可靠度評估的書籍資料中，如：Ang & Tang[4]、Paul Kales[5]、Dhillon[6]、Charles E. Ebeling[7]，均有介紹可靠度相關理論推導與計算方法、機率分佈、參數估計、最小平方法等，以估計可靠度。在失效模式與效應分析方面，如 Paul Kales[5]、柯輝耀[8]、張起明[9]均有詳細說明與實施方法，透過此縝密的分析工作，使在設計初始階段能預防缺陷、消除潛藏之失效模式、關鍵項目與研究防制的方法，以提高產品可靠度。在材料疲勞破壞方面，Collins [10]詳細介紹了影響 S-N 曲線、疲勞強度之諸多因素，如：料件表面狀況、腐蝕、表面處理、熱處理、溫度等，了解這些變數後，可做為零件設計與製造之調整參數的參考。

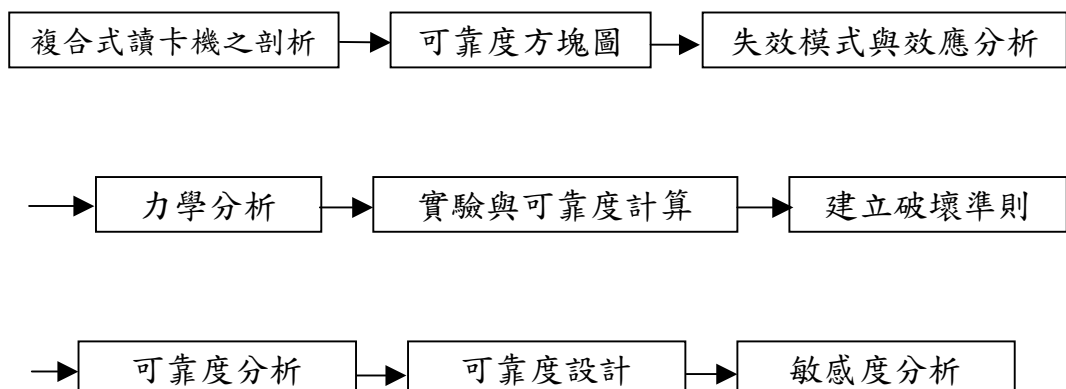
在機械元件的設計過程之中，依據強度與應力的機率分佈以估算可靠度；相反地，可以從外力、可靠度需求與一些已知條件，以決定元件的尺寸。所以在設計時，可靠度扮演的角色相當於安全因數。此外，可靠度的概念提供了元件的安全因數對於由強度與應力概念所組成的不確定事務 [11]有關的或然率關係。當應用可靠度概念設計零件時，基本數據必需已知，這些隨機變數包括：材料的強度、應力與不同的設計因素等，上述隨機變數經常被假設為常態分佈，這種假設是合理的，這是因為考慮的變數是相互獨立的，致使沒有一個變數對於其他變數有很大影響力。

對於機械件的可靠度設計而言，產品越複雜、所使用的零組件越多，可靠度越低。可靠度與產品性能一樣，應視為產品的設計參數，而且在設計之初就必須考慮，並借助可靠度驗證以利用所有可用資料做評估與證明產品對於可靠度需求的達成程度。疲勞壽命可靠度分析方法有很多，Avakov[12]於 Goodman Diagram 推導安全因數的表示式，以計算承受變動應力的安全因數，但採取以實際安全因數與理論安全因數的比值來判斷是否可靠，仍視安全因數為定值是無法符合實際需求。Mischk[13]與 May 等 [14]提出安全因數可靠度的方法，因是應用 Chebyshev 不等式，所以僅是粗略的估計方式。Bagic[15]考慮疲勞強度減少係數，如：缺口、表面粗度、尺寸、環境因素等，以修正 Miner's Rule，藉由累積損傷理論與藉助 SN 曲線做疲勞設計。Chang[16]在機械元件承受變動負荷時，提出計算疲勞壽命

可靠度的多種方法，其中提及在 Goodman Diagram 中，平均應力與應力振幅具有相同安全因數，亦即變動負荷的平均應力與應力振幅的比值相同，並應用泰勒級數展開計算強度與應力的平均值與標準差，再利用強度－應力干涉理論計算可靠度指標，是一個簡單且直接的方法，以取代傳統的安全因素，而一般在固定之應力振幅下，耗時實驗收集數據建立 SN 曲線，再利用機率分佈理論量化疲勞壽命可靠度的方式[17]是比較煩瑣。

1.4 本文研究方向

本文旨在探討複合式讀卡機之疲勞失效分析與可靠度評估。在做失效分析之前，首先對於複合式讀卡機的架構、零件組成、作動流程與影響功能的主要因素做詳細瞭解，然後建立可靠度方塊圖，以顯示可靠度相關性。然後借助失效模式與效應分析的方法以分析系統內潛藏的失效模式，發現弱點與缺失，並找出防範與補救對策，對於失效率偏高、危害系統可靠度最嚴重者做疲勞壽命可靠度評估。並經由實測、理論計算分析零件在受力狀況下的變位量。在實驗與計算可靠度方面，建立實驗方法與應用不同破壞準則，並利用 first order second moment 方法計算可靠度指標 β 值，然後研究各參數之變異程度對機件疲勞壽命之可靠度影響，並分析何種破壞準則可得到較保守之可靠度指標 β 值。在可靠度設計分析方面，進行擇優設計以獲得滿足需求與使用中不發生失效之具最佳可靠度水準之零件設計。進一步分析機件各設計參數對可靠度之敏感度分析，於敏感度分析結果之中，可選擇高敏感度參數作為設計、製造、進料檢驗重點以生產高可靠度低成本之機件。以可靠度的概念，並配合力學的觀念，求證壽命在應力與強度之關係。研究流程整理如下：



二、複合式讀卡機之介紹

2.1 卡片之規格、基本結構與特徵

研究複合式讀卡機之前，對於卡片之規格有必要先行了解，使得兩者之介面連結與操作方式對於可靠度之影響才有基本認識。

根據 ISO7810 所定義之標準塑膠卡片共有三型 ID-1、ID-2 及 ID-3，其差異僅在長寬尺寸上不同，其厚度均相同，其中目前市面上最常見為 ID-1 Type 之卡片；而日本 JIS B-9560，及我國 CNS 12821-1，均定義以 ID-1 為標準卡片。三型標準塑膠卡片之尺寸規格如表 1 所示，

表 1 ISO 7811 卡片規格表

卡片規格	寬		長		厚	
	mm	inch	mm	inch	mm	inch
ID-1	85.6	3.37	53.98	2.125	0.76	0.03
ID-2	105	4.134	74	2.913	0.76	0.03
ID-3	125	4.921	88	3.465	0.76	0.03

資料來源：ISO 7811

卡片所使用的塑膠材料在 ISO 7810 的卡片材料中有規定，考慮到印刷著色、積層加工、磁條加工、浮印加工(熱可塑性)等，使用特性配合較佳的 PVC(Polyvinyl chloride，聚氯乙烯)、PVCA(Polyvinyl chloride acetate，氯乙烯醋酸乙烯共聚合樹脂)。

磁條卡即將磁性材料(簡稱磁條)黏貼於卡片上之特定位置如圖 1 所示，系統則以特定之編碼規則，將資料讀取或儲存於該磁性材料上，在磁條卡之磁條記錄區內，則資料經由磁頭改變線圈磁性來寫入或感應磁條卡上之磁場信號，以達到資料存取之功能。磁條卡之記憶容量約 128 byte，因此其磁條所記錄者，多為個人之識別資料(如編號、密碼等)，或其他較簡單資料，但其低成本、製作方便之優點，使其能廣泛使用；但由於其不具備任何運算能力，且記憶容量少，作離線作業較不方便，同時極易受外部磁場(或電場)影響而破壞，使得其安全性及擴充性，較受限制。

IC 卡(Integrated Circuit Card)係將一個或多個具有邏輯運算處理或記憶功能之積體電路封裝於塑膠卡片之總稱。其透過卡片上之界面端子，藉由讀卡裝置與系統溝通，將資料存放於卡片內之記憶 IC(ROM 或 RAM)，再以 CPU 或直接透過端子與系統交換，因此其不會如磁條卡般易受外在磁場影響，同時由於其 IC 記憶容量有 8k、16k 及 64k bit，較磁條卡之 0.6k bit 為大，因此除一般資料存取，更可加入保護軟體，以提升資料之安全性。在 ISO 標準中，在 IC 卡的表面或裡面規定 8 個端子，端子位置尺寸如圖 2 所示，其端子的形狀是方形，最小接觸面積要有 1.7×2.0mm。各個端子有其特有的功能如表 2 所示。IC 卡基本結構如圖 3 所示。

表 2 IC 卡的端子功能

端子記號	端子名	端子的機能
C1	V _{cc}	電路電壓
C2	RST	重設信號
C3	CLK	脈衝信號
C4	RFU	未來的預備端子 (現在無法使用)
C5	GND	0 電壓
C6	V _{pp}	程式供給電壓
C7	I/O	資料輸出入
C8	RFU	未來的預備端子 (現在無法使用)

資料來源：[2]

IC 卡具有下列特徵：

1. 具有運算功能，可以管理記憶體
2. 資料可消去，也可再度寫入
3. 資料的保密功能優良

磁條卡與 IC 卡之比較如表 3 所示，可知兩者因存放資料的載具不同，使得 IC 卡可以取代磁條卡，改良了磁條卡的缺點。實際應用時，IC 卡係由金融機構將持卡人之金融帳戶相關資料，由原本存放在磁條內改為存放在晶片上，由於存放在晶片內之邏輯運算與基碼長度是由發卡機構於發卡時所決定，其 IC 卡產製之驗證碼或簽章只有發卡機構知道，所以交易安全由發卡機構與卡片 (End to End) 決定，與網路成員無關，使整個交易之安全卻大大提升，所以 IC 卡是高科技的產品，比一般的磁條卡更安全，

不易被偽造。

表 3 磁條卡與 IC 卡之比較

	IC 卡	磁條卡
尺寸(長×寬×厚)	54mm×86mm×0.76mm	同左
資訊儲存媒體	IC 記憶體	磁性體
記憶容量	2000 字(使用 16k bit 記憶體時) 8000 字(使用 64k bit 記憶體時)	72 字 (約 0.58k bit 的記憶體容量)
優點	安全功能強 通用性高 記憶體容量大	卡片容易保管 價格便宜
缺點	卡片不易保管 價格高 抗靜電力弱	安全上有缺失 通用性有限 抗磁力弱
價格	高(每張成本約 100 元)	便宜(每張成本約 4 元)

資料來源：[2]

2.2 複合式讀卡機之架構與零件組成

手動進出型(Manual Operated Type) 複合式讀卡機如圖 4 所示,是以手動插入 IC 卡至與讀取頭靜態相連結或插入磁條卡與磁頭做動態滑動摩擦,之後再以手動拉出。其設計要點在於讀取卡片資料之穩定性、可靠性等性能上,以使交易能夠快速完成。複合式讀卡機之架構如下:(1)塑膠構架與機架(2)卡片偵測裝置(3)介面電路板(4)磁條卡之磁頭裝置(5)IC 卡之讀取頭裝置(6)電磁閥裝置。此架構之零件組成如圖 5~圖 13 所示。

2.3 複合式讀卡機之作動流程

手動進出型複合式讀卡機,當卡片進入時,會滑動經過磁頭,並連帶推動讀取頭壓接於卡片之外部連接端子面上,而到達定位時會觸動微動開關 2 組合,告知卡片已達定位。為使卡片平順穩定推送,目前一般設計多採一偵測桿與彈簧,直接平均施壓力於卡片邊,使卡片沿另一滑動邊做靠

單邊之前後滑行之運動如圖 14 所示。IC 卡採讀取頭與卡片之外部連接端子做靜態連結如圖 15 所示，而磁條卡則以動態刷動使磁頭讀取磁條上之資料如圖 16 所示，因此其讀取系統大不相同。複合式讀卡機之作動流程如圖 17 所示。

由此作動流程可知，複合式讀卡機是由獨立單元所連接而成的複雜系統，其中任一單元的失效將會導致整個系統失效，此種組件的連接方式即為串聯系統。此系統的可靠度受到最弱單元可靠度的限制。串聯可靠度的計算採用乘法律。即假設一系統有 n 個組件，其在指定環境及時段內的組件可靠度分別為 R_1 、 R_2 …… R_n ，則其在指定環境及時段內系統操作的串聯系統可靠度 R_s [5] 為

$$R_s = R_1 \times R_2 \times \cdots \times R_n \quad (2-1)$$

上式的另一意義為「若 R_s 保持不變，當組件個數 n 越多時，則各組件可靠度 R_i 必須提高」。換句話說，「各組件的失效機率必須相對降低」。

2.4 影響複合式讀卡機之主要因素

2.4.1 構造組成

複合式讀卡機之結構、材料、使用等，多為隨機因素。強度、壽命或應力等亦具隨機性，呈一定統計分佈狀態，由大量數據統計發現材料強度等數據多為常態分佈，疲勞壽命等數據為韋伯分佈[18]，讀卡機之失效機率分佈與零件類型、材料種類、應力狀態及使用環境等有關。

圖 18 所示之組件爆炸圖為複合式讀卡機之構造組成的相關組合位置之示意圖，其功能依圖內之料件編號依序列述如下：

1. 塑膠構架—複合式讀卡機之主結構體，以鎖附與支撐相關零件。
2. 磁頭組合(磁頭、固定架與軟排線)—讀取磁條卡資料。
3. 圓錐螺旋彈簧—對磁頭裝置施加壓力。
4. 螺絲 2—將磁頭裝置與圓錐螺旋彈簧定位在塑膠構架之上。
5. 定位銷 3—定位磁頭裝置在塑膠構架之上。

6. 定位銷 2—限定磁頭固定架之組裝高度與定位磁頭裝置在塑膠構架之上。
7. 機架螺絲—鎖固左與右機架於塑膠構架之上。
8. 左機架—為複合式讀卡機與其他機構鎖固連結的介面。
9. 螺絲 1—將微動開關 2 組合鎖固在塑膠構架之上。
10. 微動開關 2 組合—告知卡片已達讀取之定位。
11. 定位銷 1—將偵測桿定位於塑膠構架之上。
12. 偵測桿—觸動介面電路板之微動開關 1，以偵測是否有卡片出入。
13. 壓縮彈簧—施壓力於偵測桿觸動微動開關 1，並使卡片沿另一滑動邊做靠單邊之前後滑行之運動。
14. 右機架—為複合式讀卡機與其他機構鎖固連結的介面。
15. IC 卡之讀取頭裝置—讀取 IC 卡資料，經其軟排線將資料送至相關介面做處理。此裝置之零件分解如圖 12 所示。
16. 拉伸彈簧 1—在卡片取出之同時，使 IC 卡之讀取頭裝置回位。
17. 介面電路板—為連接器與信號傳輸處理之介面。
18. 介面電路板螺絲—將介面電路板鎖固在塑膠構架之上。
19. 電磁閥—鎖住卡片之動力來源。
20. 拉伸彈簧 2—釋放卡片之動力來源，使連桿組 1 與連桿組 2 回位。
21. 扣環—將歸位桿浮扣其在塑膠構架之定位柱上。
22. 歸位桿—當圖 13 之電磁閥裝置無法回位時，推動此桿可使其回位。
23. 連桿組 1—因電磁閥的動作而推動連桿組 2。
24. 連桿定位銷—將連桿組 2 定位於塑膠構架之上。
25. 連桿組 2—在讀取卡片資料時，鎖住卡片，以免資料未被讀取完畢即將卡片取出。

2.4.2 操作方式

磁條卡藉由手之動態刷動，用滑動磨擦接觸方式使磁頭讀取磁條的資料，因此彈簧施予磁頭之正向垂直力決定了磁條卡與磁頭之間的摩擦力與使用壽命，因此兩者均會產生磨損，目前日本廠商所製造之磁頭在施與 400g 之負荷下，其壽命可達 50 萬次卡片刷動。

IC 卡之讀取頭裝置藉由靜態連結與卡片的 8 個端子接合，產生接觸界面上的正向接觸力，以讀取晶片的資料，因此於設計使用時需使 IC 卡

外部連接端子及讀卡機讀取頭不致因相互接觸滑動造成摩擦磨損而減短使用壽命甚至於無法使用。在機構設計時，不可僅以一般連接器的滑動接觸方式來思考，以免因端子磨損與接觸力不足而嚴重影響其穩定性與使用壽命。必須具有 Landing 功能，才不致因磨損而失效，因此平均一張 IC 卡的使用壽命可讀取高達 10 萬次。IC 卡與讀取頭裝置之連結接觸力為 0.2N ~ 0.6N，機構設計符合此設計規範方能通過 EMV L1 之認證，所謂 EMV 是由 Europay 與 VISA 及 Master Card 兩大國際信用卡組織等三家公司成立一家 EMV Co. 的公司，共同制訂 IC 卡的全球共通標準(稱作 EMV Integrated Circuit Card Specifications)，目的是想藉由標準制訂的力量來統一全球信用卡的 IC 智慧卡市場。

2.4.3 零件材料

零件材料之選用，應依其材料性質及用途，在不影響成本、可製造性、功能與可靠度等之情況下作適當決定。讀卡機失效往往與彈簧疲勞關係密切，因為磁條卡之磁頭裝置與 IC 卡之讀取頭裝置均藉由彈簧的輔助以讀取卡片資料。彈簧材料在生產製造過程中可能產生各種缺陷，尤其彈簧線材或板材在拉製或沖壓成形過程之過速、斷面收縮率過大、潤滑不良、熱處理不當、材料有裂紋、表面脫碳等影響頗大。如彈簧設計時，選擇材質或參數不當，亦常為造成失效之主因。

一件機械產品，其主要的成本乃在材料的花費上，機械零件的失效模式以破損、疲勞等現象居多。在設計上材料選擇的巧拙不只左右製品的良否，也大大影響性能、經濟性；選擇材料的基本觀念是設計、製作機械零件時，充分考慮該零件要求的性能，選擇適合零件的材料，施行適合的加工或處理[19]。對於新產品或新設計，材料選用程序之原則如下[20]：

1. 計算材料所需承受之靜態負荷與動態疲勞負荷，以決定材料所需抗拉強度與降伏應力之最小值。
2. 淘汰不適合之材料，再從各種合適之材料中，比較材料之成本、製造性、產品製造後效能之好壞及材料之供應是否充份等，選擇最適合之材料。

2.5 讀取頭裝置之回位彈簧

讀取頭裝置有一拉伸彈簧，其主要功能為當 IC 卡取出之同時，使讀

取頭裝置立即回位。當此彈簧產生疲勞而長度增加的現象時，會使得讀取頭裝置無法回到原位，此時彈簧增加的長度過大時會使得 IC 卡插入時造成其上之外部連接端子與 IC 卡讀取頭端子產生提前接觸之相對滑動摩擦而減短使用壽命甚至於無法使用，因此如何確保該拉伸彈簧的使用壽命，是做到靜態連結以讀取資料之基本設計要求。

2.5.1 彈簧特性

大多數機械元件設計之變形量均以愈小愈佳，即應具高剛性，但彈簧之設計要求則恰好相反，需有較大變形能力，即受負荷時，能作定量之變形；移除負荷時，能恢復原來之形狀或位置。換言之，彈簧需具高彈性能，直接承受軸向力，可儲存能量。在動態條件時，應考慮疲勞強度問題。彈簧可靠度涉及彈簧各項性能要求，包括力學、物理或化學性能等，尤其耐疲勞及抗鬆弛性能方面，繫於正確之彈簧設計、製造及選用。對於設計性能要求高之彈簧，已從靜態強度設計進展至動態疲勞壽命設計之趨勢。

$$U = \int Bd\delta \quad (2-2)$$

式中 U ：應變能，即彈簧受負載後所儲存之能量

B ：負載

δ ：變形

由承受外力負荷的大小，可決定彈簧的強度，影響工作應力大小的因素有：

1. 加於彈簧負荷的形態
2. 腐蝕效應
3. 彈簧表面狀況
4. 振動及衝力的效應
5. 材料成分及熱處理

2.5.2 彈簧材料

一般常用之彈簧材料為琴鋼線(Music Wire)，材料為高品質高碳鋼線，其具備之特性為韌性高、抗拉強度高、高精度之荷重特性、耐蝕性良好、

加工安定性良好、尺寸精度高、能承受反覆疲勞負荷等。通常彈簧材料之各種機械性質隨溫度上升而減少，此溫度隨材料化學成分、製造方法而異。疲勞限度因平均應力的大小而變化。琴鋼線是用琴鋼線材施行勒化處理(patenting)，藉由強力抽線加工，賦予良好的尺寸精度、良質的表面外觀、提高機械性質等。勒化是將高碳鋼線在變態點以上的溫度連續加熱，在約 500 的熔鉛等中冷卻，作成富加工性的組織。

此外，彈簧材料也採用硬質不銹鋼線，這是將不銹鋼線材用火、酸洗、強力冷抽線作成，耐蝕性優良，也適合於耐熱性、非磁性的場合。

2.6 IC 卡讀取頭

圖 19 所示為 IC 卡讀取頭的端子與編號順序，此 8 個端子的主要功能為讀取 IC 卡的資料，其讀取動作為在 IC 卡插入的同時，IC 卡讀取頭的滑動部會在塑膠構架之軌道上因 IC 卡之推動而滑行，在到達定位碰觸微動開關組合的同時，如圖 14 所示，讀取頭裝置會因軌道高度的變化而往上移動，以與卡片之外部連接端子做靜態連結，如圖 15 所示，此設計可避免兩者之接點端子因相對滑動而磨損，造成不利於兩者之使用壽命與可靠度。IC 卡的插卡與取卡操作，使讀取頭的端子會產生變位量，因而端子承受週期應力，端子的疲勞限度取決於應力振幅，應力振幅越小則疲勞壽命越高，所以 IC 卡讀取頭與 IC 卡之間的訊號傳遞品質高低，由讀取頭端子之疲勞壽命決定。

整個讀取頭之製程是利用塑膠射出成形模具，將利用沖壓成形的端子嵌入 PC+20%GF (即 Polycarbonate+20%Glass Fiber，聚碳酸酯+20%玻璃纖維)的塑膠材料中。

2.6.1 端子

IC 卡讀取頭的端子，其形狀似一旋臂樑，當卡片到達定位時，端子讀卡之受力狀況如圖 20 所示，因有八個端子，所以類似於八個薄板彈簧的設計，其乃用厚度 0.3mm 之磷青銅薄板材料，沖壓加工成所需形狀，而具有彈簧作用。其特色如下：有彈簧作用而位移大者因用薄板，應力可較小，理由是彎曲撓度一定時，板厚較小者可減少彎曲應力，其意即薄板彈簧於

彎曲使用時的撓度可較大。作用於薄板彈簧的荷重與撓度的關係也可設計成非線性，這是在彈簧彎曲中，改變用為彈簧的有效跨距，及利用板大撓度的非線性特性。缺點是板厚的些微不同會使彈簧常數變化，設計使用上若不注意，會引起應力集中，導致疲勞破損。薄板彈簧設計上的問題是在選定可得必要彈簧力或撓度的形狀與推定彈簧產生最大應力的位置和大小。

形狀似薄板彈簧的端子，其選用之材料可為銅合金，具有良好電傳導性、耐蝕性，但是彈性係數小、耐熱性少。鈹銅在銅合金彈簧材料中，性能最優良，除 Be 之外，也添加 Ni、Co，防止溶體化處理時結晶粒粗大化，藉真空熔解而可得優秀者，約在 800 進行溶體化處理，進行適當之冷間加工。實用的彈簧用磷青銅為含 Sn 3~5.5, 5.5~7, 7~9%三種 Cu 合金，為除去氧化物而易伸長起見，加入少量 P 為脫氧劑，乃古來所用之銅合金，其機械性質因冷間壓延程度而異，要配合彈簧加工的程度而選用，彈簧加工後的低溫退火宜約 250 。

若讀取頭的端子與 IC 卡的端子為兩種不同的金屬或合金於接觸時，當溫度升高，將產生熱電動，類似於低壓直流信號。因此若考慮操作信號準位及溫度變化，端子接觸物間最好採用相同之材質。對端子而言，大氣及電化作用之腐蝕最嚴重，大氣腐蝕依環境中污染物之含量與種類而定，特別是氧化作用隨溫度升高而劇烈。當兩種不同材質之金屬以一種離子鹽處方接合在一起時，將產生電化腐蝕作用，其嚴重程度依金屬與離子鹽的電化特性而定[21]。

使用於端子(接觸點)之接觸基座金屬(Contact Base Metal)，必須有良好的彈性，容易被精密製成，同時能耐腐蝕或能夠被電鍍。基座金屬電性和機械特性如表 4 所示，並分述如下：

1. 黃銅(Brass)是一個價格低廉、良好導電性的材料。但它不能承受過多的置入、取出週期性的重覆使用，同時黃銅的柔韌性將隨著壽命長而降低；在多次重壓之下，導電性將受制於晶化的產生，因為晶化降低其導電性。黃銅也易於捲縮、焊合、鎔接、銅鋅合金銲接等。所以，黃銅適合於許多非重要性的、低接觸力的應用上。

2. 磷青銅(Phosphor-Bronze)：主要的合金為銅、錫，有良好的柔韌性，

但是價格約為黃銅的二倍，其導電性約為純銅的一半。有些磷青銅合金也有良好的柔韌性和導電性，加上良好的耐腐蝕性和銲接性，這類材料能做出一般用途的連接器端子。

3. 鈹銅(Beryllium-Copper)：除銅之外，含鈹量約 2%，有良好的機械性、電氣特性和熱特性並且也有防腐蝕性和耐磨損性。鈹銅對於成型及硬化，有很好的響應，同時也是任何可比較硬度的彈性合金中最好的導體。鈹銅硬度較大，較不易彈性疲乏，比其他以銅為基礎(Copper-base)的彈性合金中，較能承受更多的置入、取出週期性的重覆使用。然而其價格，是這些基本連接器端子材質當中，費用最高的。
4. 鎳銀(Nickel-Silver)合金其機械特性類似於磷青銅合金，能防止氧化，因此不須再電鍍。鎳銀合金對於壓力的侵蝕是敏感的，但是不像黃銅會伸長。
5. 銅合金 725(Copper Alloy 725)是相當新的鎳銅合金，含有少量的錫。銲接和一般使用情況均較鎳銀合金為佳。

表 4 基座金屬電性與機械特性

基座金屬電性和機械特性

金屬	密度 (磅/吋 ³)	張力 (× 100 磅/吋 ²)	彈性係數 (× 10 ⁶ 磅/吋 ²)	疲乏強度 (在 10 ⁸ 週期 磅/吋 ²)	導電性 (在 68°F) (% IACS)	熱導性 (Btu/sq.ft/ hr/°F)	防腐蝕性
黃銅	0.320	50 ~ 90	17	21 ~ 16	25 ~ 50	60 ~ 120	佳
磷青銅	0.320	50 ~ 122	16	非常的變化	12 ~ 35	35 ~ 100	優
鈹、銅	0.320	100 ~ 200	18	35 ~ 45	18 ~ 60	62 ~ 150	佳
鎳、銀	0.315	50 ~ 100	18	30 ~ 35	5 ~ 12	20 ~ 30	最佳
CA725	0.321	55 ~ 120	19		11	31	最佳

資料來源：[21]

2.6.2 滑動磨耗

兩個接觸固體表面只要有相對滑動存在，必定會產生磨耗。材料被磨掉的速率，視工作狀況而定。例如：負荷量、潤滑與環境。摩擦實際上是一種切割作用(cutting action)，由疏鬆而堅硬的粒子，在兩配合面間滑動(三

物體摩擦)或僅為粒子在一表面上摩擦(二物體摩擦),亦會因一對摩擦表面其中的一個粗糙面所引起[22]。

讀取頭裝置的讀取動作為在 IC 卡插入的同時,它會在塑膠構架之軌道上因 IC 卡之推動而滑行,最終會因軌道高度的變化而往上移動,以與卡片之外部連接端子做靜態連結。讀取頭滑動部與塑膠構架之材料均為 PC +20%GF+少量 PTFE,其材質硬度高、耐高溫與低溫變化、射出成形尺寸安定、耐酸鹼侵蝕、耐磨、低摩擦係數,再因讀取頭裝置之重量甚輕且卡片施加於端子的力量甚小(20~60g),使得施加在滑行軌道之垂直作用力甚小,故滑動之摩擦力非常小,致使磨耗是非常微量。

2.6.3 表面處理

用表面處理法來減少接觸磨耗是非常重要的。表面可用不同方法使其硬化,以增加耐磨耗性,或覆蓋一層耐磨耗材料,也可減少磨耗。讀取頭端子與卡片之外部連接端子做靜態連結,對於兩者之端子表面因磨損而造成讀取資料失效的問題不存在。讀取頭端子設計為懸臂式接觸(Cantilever Contacts),其順從性差但成本低,為了減少讀取頭端子與 IC 卡端子於連結時的接觸阻抗,在讀取頭端子之表面會鍍上一層金,其厚度約 5μ 。電鍍常被用於金屬端子,是為了防止磨損、腐蝕和氧化,促進金屬與金屬間的接觸,有數種金屬被使用於電鍍金屬端子當中,如下所述。

1. 金是非常好的導體和高穩定的材質,它有最低的接觸阻抗,同時有最好的防腐蝕性。硬金電鍍常用於置入、取出次數較多的地方。重覆使用於次數較高之所,金被注入於石墨中,僅增加極少的接觸阻抗。
2. 金覆蓋銀(Gold-over-silver)的電鍍,應用於乾電路是有益的。因為它有低的接觸阻抗,但是對於腐蝕的抵抗力非常有限。
3. 金覆蓋鎳的電鍍是最被為廣泛使用的電鍍組合,它將金電鍍於表面,而鎳電鍍於下層,能防止基座金屬的移動並且使金的需求量減至最小。

綜合前述分析,影響複合式讀卡機可靠度之主要因素:1.構造組成:料件運動方式、結構強度、功能。2.操作方式:(1)磁條卡:動態刷動(2)IC 卡:

靜態連結。3.零件材料選用:成本、可製造性、功能、可靠度、考慮承受之靜態負荷與動態疲勞負荷,以決定材料所需抗拉強度與降伏應力之最小值。4.使用環境。上述四種影響因素縱使能有效控制而消弭,並不表示讀卡機不會壞、可靠度百分之百,而僅是表示製造商生產的讀卡機擁有高品質、高「固有可靠度」,而讀卡機在使用者的「操作可靠度」會與當初的設計或測試評估有差異,隨著操作時間的增加而可能降低可靠度。在數理統計上,可靠度是條件機率問題,若使用條件不同,即使是同一產品其可靠度不盡然相同。



三、複合式讀卡機之失效分析

提高產品可靠度的不二法門乃在於設計時預防缺陷與消除失效。因此，失效模式與效應分析(Failure Modes and Effects Analysis, FMEA)乃因應而生。研發工程人員自初始設計階段開始，若透過縝密的分析工作，評估、驗證系統內可能的失效模式，可使得設計及時改進，朝向最佳的設計目標。FMEA 之目的在於設計階段中研究失效的因果關係並提供一套有效的程序，以處理所有潛藏的失效模式、設計結構之缺陷與發現薄弱環節，俾據以改進或防範，及時補救缺失[23]。

3.1 失效模式與效應分析

FMEA 是分析系統內潛在之失效模式對此系統上將造成之結果與效應，然後依其可能發生失效模式之嚴重等級加以區分，並研究其防制方法的一種作業程序。其原理簡單，適合於設計階段使用，亦可用在製造階段使用，較適於探討單一因素之失效模式，惟對多重失效模式同時作用或相互影響者，FMEA 將難以分析。應用 FMEA 技術找出設計或製程階段之失效模式並改善，是一種常用可靠度設計定性分析方法，FMEA 從產品失效現象著手，具有系統性分析零件、組件、模組、子系統、系統等所有可能失效模式、失效原因與後果，其目的在於確立低層次組件可能之失效模式，探討其失效發生原因，由下向上對系統之影響，並找出設計中潛在之薄弱環節，以採行預防性措施，謀求改進對象，提高系統可靠度。

FMEA 之失效(failure)係指產品或產品之一部分組件未能執行預定功能之狀態或事件，亦即失效乃產品喪失規定之功能。失效模式(failure mode)係指具體描述失效之表現樣態或故障現象。效應(effect)指對直接或間接相關事務之影響與關聯性，分析(analysis)係指對失效之表面現象進行系統性、結構性之科學探討方法。失效的偵察法包含目視、聽覺警示裝置、感應查表、自動檢測裝置等方式。在失效的補救措施上，可加裝增加安全性的並聯裝置，即替換模式。

FMEA 之實施步驟：

1. 列出系統功能方塊圖或可靠度方塊圖，對每一方塊元素賦予一識別碼。

2. 列出項目名稱。
3. 該項目之輸出功能加以描述。
4. 將儘可能之假想該項目無法符合原訂之功能或規格之失效模式均加以評估列記，對每一假定之失效模式之可能失效原因一一加以說明。針對每一失效模式及原因項目在識別碼後依序編號。
5. 列出此失效模式之階段時機。
6. 此失效模式發生後對局部、次級及終極之效應詳加說明。
7. 偵測此失效模式發生之方法。
8. 填寫失效發生後之應變措施及防制措施。
9. 考量失效模式發生後對任務產生之影響，依嚴重等級加以區分為四級。
10. 最後註記對解決潛在問題所需之補充說明及建議。

進行 FMEA 須事先劃分失效之嚴重度等級，其分類及定義如下；俾據以判斷失效模式對系統影響之嚴重程度或後果。

1. I 級失效(Catastrophic，災難性)：凡導致整個系統喪失或造成致命性傷害之失效情況屬之。
2. II 級失效(Critical，關鍵性)：凡主要系統受損將導致任務失敗或造成嚴重傷害之失效情況屬之。
3. III 級失效(Marginal，邊際性)：凡次要系統受損將降低甚至於喪失可使用度及導致無法完全達成任務者或造成較小傷害之失效情況屬之。
4. IV 級失效(Minor，輕度)：凡不致於造成傷害或系統之受損者，惟將導致不定期之維護或修理之失效情況屬之。

如(分)系統無量化之失效數據或機率時，可以下列質化方式加以區分失效模式之發生機率等級如下：

1. A 級(Frequent，經常發生)： $0.2 < Pr < 1$
2. B 級(Reasonably Probable，常發生)： $0.1 < Pr < 0.2$
3. C 級(Occasional，偶而發生)： $0.01 < Pr < 0.1$
4. D 級(Remote，極少發生)： $0.001 < Pr < 0.01$
5. E 級(Extremely Unlikely，幾乎不可能發生)： $Pr < 0.001$

將判定之失效模式之嚴重度等級 I、II、III、IV 用 1、2、3、4 表示。將判定之失效模式之發生機率等級 A、B、C、D、E 與嚴重度等級之 1、2、3、4 相乘得出結果 1A、1B、2C、3D... 等，作為危害性評定指數[17]。依

表 5 建議準則判定，經危害性評定，首應儘量消除危害性高之第一類:1A、2A、1B、3A、2B、4A、1C，其餘次之，如無法消除時，要儘量從設計製造使用維修等方面去減少發生機率，並根據危害性不同情形，相對增加保護裝置、監控系統、警報裝置等。依上述步驟擬定複合式讀卡機組件 FMEA 之嚴重等級如表 6 所示。

表 5 危害性指數評定類別及建議處理準則

危害性指數類別	建議處理原則
第一類:1A、2A、1B、3A、2B、4A、1C	不可接受之失效模式
第二類:3B、2C、4B、1D、3C、2D	不希望存在之失效模式
第三類:4C、1E、3D、2E	審酌後可接受之失效模式
第四類:4D、3E、4E	無須審酌即可接受之失效模式

表 6 複合式讀卡機組件失效之嚴重等級

複合式讀卡機零組件失效之嚴重等級	嚴重等級
關鍵組件失效，整個裝置無法動作	I
磁頭或 IC 卡讀取頭組合，因不良而致無法讀取卡片資料	II
零組件失效，致讀取動作不良	III
零組件失效，影響讀卡機動作	IV

經 FMEA 分析後，系統弱點及缺失將顯見於分析結果，對於失效率偏高或不易維護之設計或設備，應改進設計或另擇優者替代之，否則必須有詳盡之備料管理與維護作業。對於關鍵性極高之設備失效及較嚴重失效事件，即令發生機率極低，也必須以改進設計，並以緊急作業系統避免之。

複合式讀卡機之可靠度方塊圖如圖 21 所示，所謂可靠度方塊圖即為「第一系統各功能本質於操作相互關係及相依關係之方形關連圖」。零組件與編號如表 7 所列，並分別實施 FMEA 如表 8~表 31，以供設計改善參考，複合式讀卡機 FMEA 之結果如表 32、表 33 所示，IC 卡讀取頭與拉伸彈簧 1 之失效將是複合式讀卡機之失效模式中有最嚴重後果、危害壽命最大，故可靠度分析與試驗以此兩者為研究分析重點。

表 7 複合式讀卡機零組件與編號

零組件名稱與編號			
24-1 塑膠構架	24-2 左/右機架	24-3 機架螺絲	24-4 偵測桿
24-5 定位銷 1	24-6 壓縮彈簧	24-7 微動開關 2 組合	24-8 螺絲 1
24-9 磁頭組合	24-10 圓錐螺旋彈簧	24-11 定位銷 2	24-12 定位銷 3
24-13 螺絲 2	24-14 IC 卡讀取頭組合	24-15 拉伸彈簧 1	24-16 電磁閥
24-17 連桿組 1	24-18 連桿組 2	24-19 連桿定位銷	24-20 拉伸彈簧 2
24-21 歸位桿	24-22 扣環	24-23 介面電路板螺絲	
24-24 電子零件、連接器、電路板			

表 8 FMEA - 塑膠構架

零件編號	24-1	零組件名稱	塑膠構架
功 能	複合式讀卡機之主結構體，以鎖附與支撐相關零件		
失效模式	1. 變形 2. 磨損		
失效原因	1. 讀卡機安裝於過熱之環境中，造成變形 2. IC 卡讀取頭之滑動部造成其軌道磨損		
失效效應	1. 整個讀卡機無法動作 2. IC 卡讀取頭無法讀取 IC 卡資料		
嚴重等級	1. 嚴重等級 I 2. 嚴重等級 III		
發生機率	1. E 2. D		
檢測方法	1. 卡片是否可插入 2. 是否可讀取 IC 卡資料		
因應措施	1. 安裝與操作環境說明書 2. 選用耐磨耗之塑膠材料		

表 9 FMEA - 左/右機架

零件編號	24-2	零組件名稱	左/右機架
功 能	為複合式讀卡機與其他機構鎖固連結的介面		
失效模式	腐蝕生銹		
失效原因	安裝於潮濕之環境中		
失效效應	讀卡機鬆動		
嚴重等級	嚴重等級 I		
發生機率	E		
檢測方法	目視檢驗		
因應措施	安裝與操作環境說明書、選用耐腐蝕之金屬材料		

表 10 FMEA - 機架螺絲

零件編號	24-3	零組件名稱	機架螺絲
功 能	鎖附左/右機架於塑膠構架上		
失效模式	1. 鬆脫	2. 腐蝕生鏽	
失效原因	1. 組裝不良、振動環境	2. 安裝於潮濕之環境中	
失效效應	1. 複合式讀卡機鬆動或脫落	2. 複合式讀卡機鬆動或脫落	
嚴重等級	1. 嚴重等級 III	2. 嚴重等級 IV	
發生機率	1. D	2. D	
檢測方法	目視檢驗		
因應措施	1. 機械螺絲鎖緊力量規範、點膠固定、加防鬆墊圈 2. 螺絲表層鍍鋅或鍍		

表 11 FMEA - 偵測桿

零件編號	24-4	零組件名稱	偵測桿
功 能	偵測是否有卡片出入		
失效模式	變形		
失效原因	讀卡機安裝於過熱之環境中，造成變形		
失效效應	卡片無法插入		
嚴重等級	嚴重等級 III		
發生機率	D		
檢測方法	卡片是否可插入		
因應措施	安裝與操作環境說明書		

表 12 FMEA - 定位銷 1

零件編號	24-5	零組件名稱	定位銷 1
功 能	將偵測桿定位於塑膠構架之上		
失效模式	1. 脫落	2. 腐蝕生鏽	
失效原因	1. 鬆配合	2. 安裝於潮濕之環境中	
失效效應	偵測桿脫落，無法讀取卡片資料，無法偵測卡片出入狀況		
嚴重等級	1. 嚴重等級 III	2. 嚴重等級 III	
發生機率	1. D	2. D	
檢測方法	目視檢驗		
因應措施	1. 點膠固定、緊配合 2. 選用耐腐蝕之金屬材料或表面處理		

表 13 FMEA - 壓縮彈簧

零件編號	24-6	零組件名稱	壓縮彈簧
功 能	施壓力於偵測桿觸動微動開關 1，並使卡片沿另一滑動邊做靠單邊之前後滑行之運動		
失效模式	1. 腐蝕生銹	2. 疲勞鬆弛	
失效原因	1. 安裝於潮濕之環境中	2. 彈簧長期受力，造成疲勞失效	
失效效應	1. 銹蝕造成彈力降低	2. 偵測桿動作失效或不穩定	
嚴重等級	1. 嚴重等級 III	2. 嚴重等級 III	
發生機率	1. D	2. D	
檢測方法	1. 目視檢驗	2. 定期檢視	
因應措施	1. 彈簧做耐腐蝕之表面處理 2. 設計小的作動行程或限定壓縮量之設計		

表 14 FMEA - 微動開關 2 組合

零件編號	24-7	零組件名稱	微動開關 2 組合
功 能	告知卡片已達讀取之定位		
失效模式	1. 開關失效	2. 連接線脫焊	3. 連接器接觸不良
失效原因	1. 壽命終止	2. 焊接不良	3. 打端子製程不良
失效效應	無法得知卡片已達讀取之定位而處理資料		
嚴重等級	嚴重等級 III		
發生機率	D		
檢測方法	定期檢視		
因應措施	1. 定期檢視更換	2. 焊接規範	3. 製程品管

表 15 FMEA - 螺絲 1

零件編號	24-8	零組件名稱	螺絲 1
功 能	將微動開關 2 組合鎖固在塑膠構架之上		
失效模式	1. 鬆脫	2. 腐蝕生銹	
失效原因	1. 組裝不良、振動環境	2. 安裝於潮濕之環境中	
失效效應	微動開關 2 組合鬆動或脫落而無法得知卡片已達讀取之定位而處理資料		
嚴重等級	1. 嚴重等級 III	2. 嚴重等級 IV	
發生機率	1. D	2. D	
檢測方法	目視檢驗		
因應措施	1. 自攻螺絲鎖緊力量規範、點膠固定 2. 螺絲表層鍍鋅或鍍		

表 16 FMEA - 磁頭組合

零件編號	24-9	零組件名稱	磁頭組合(磁頭、固定架、軟排線)
功 能	讀取磁條卡資料		
失效模式	磁頭無法讀取資料		
失效原因	1. 磁頭磨損	2. 軟排線焊接不良	3. 異物割傷軟排線
失效效應	無法讀取磁條卡資料		
嚴重等級	1. 嚴重等級 III	2. 嚴重等級 III	3. 嚴重等級 II
發生機率	1. D	2. D	3. E
檢測方法	1. 定期檢視	2. 目視檢驗	3. 目視檢驗
因應措施	1. 定期檢視更換	2. 焊接規範	3. 組裝規範

表 17 FMEA - 圓錐螺旋彈簧

零件編號	24-10	零組件名稱	圓錐螺旋彈簧
功 能	施壓力於磁頭組合以讀取磁條卡資料		
失效模式	1. 腐蝕生銹	2. 疲勞鬆弛	
失效原因	1. 安裝於潮濕之環境中	2. 彈簧長期受力，造成疲勞失效	
失效效應	1. 銹蝕造成彈力降低	2. 讀取磁條卡資料不穩定	
嚴重等級	1. 嚴重等級 III	2. 嚴重等級 III	
發生機率	1. D	2. D	
檢測方法	1. 目視檢驗	2. 定期檢視	
因應措施	1. 彈簧做耐腐蝕之表面處理	2. 設計小的作動行程	

表 18 FMEA - 定位銷 2

零件編號	24-11	零組件名稱	定位銷 2
功 能	限定磁頭固定架之組裝高度與定位磁頭裝置在塑膠構架之上		
失效模式	1. 脫落	2. 腐蝕生銹	
失效原因	1. 鬆配合	2. 安裝於潮濕之環境中	
失效效應	磁頭移位，無法讀取磁條卡資料		
嚴重等級	1. 嚴重等級 III	2. 嚴重等級 III	
發生機率	1. D	2. D	
檢測方法	目視檢驗		
因應措施	1. 點膠固定、緊配合	2. 選用耐腐蝕之金屬材料或表面處理	

表 19 FMEA - 定位銷 3

零件編號	24-12	零組件名稱	定位銷 3
功 能	定位磁頭裝置在塑膠構架之上		
失效模式	1. 脫落	2. 腐蝕生銹	
失效原因	1. 鬆配合	2. 安裝於潮濕之環境中	
失效效應	磁頭移位，無法讀取磁條卡資料		
嚴重等級	1. 嚴重等級 III	2. 嚴重等級 III	
發生機率	1. D	2. D	
檢測方法	目視檢驗		
因應措施	1. 點膠固定、緊配合	2. 選用耐腐蝕之金屬材料或表面處理	

表 20 FMEA - 螺絲 2

零件編號	24-13	零組件名稱	螺絲 2
功 能	將磁頭裝置與圓錐螺旋彈簧定位在塑膠構架之上		
失效模式	1. 脫落	2. 腐蝕生銹	
失效原因	1. 組裝不良、振動環境	2. 安裝於潮濕之環境中	
失效效應	磁頭移位，無法讀取磁條卡資料		
嚴重等級	1. 嚴重等級 III	2. 嚴重等級 IV	
發生機率	1. D	2. D	
檢測方法	目視檢驗		
因應措施	1. 自攻螺絲鎖緊力量規範、點膠固定 2. 螺絲表層鍍鋅或鍍		

表 21 FMEA - IC 卡讀取頭組合

零件編號	24-14	零組件名稱	IC 卡讀取頭組合
功 能	讀取 IC 卡資料，經其軟排線將資料送至相關介面做處理		
失效模式	無法讀取 IC 卡資料		
失效原因	1. 讀取頭端子失效	2. 讀取頭滑動部磨損	
	3. 軟排線焊接不良	4. 軟排線之訊號線折斷或被割斷	
失效效應	1. 長期使用造成疲勞失效無法讀取 IC 卡資料 2. 磨損使讀取頭端子與 IC 卡端子之接觸力降低 3. 無法傳輸資料 4. 無法傳輸資料		
嚴重等級	1. 嚴重等級 II	2. 嚴重等級 II	3. 嚴重等級 III 4. 嚴重等級 II
發生機率	1. C	2. C	3. D 4. E
檢測方法	1. 定期檢視	2. 定期檢視	3. 目視檢驗 4. 目視檢驗
因應措施	1. 預估壽命	2. 預估壽命	3. 焊接規範 4. 組裝規範

表 22 FMEA - 拉伸彈簧 1

零件編號	24-15	零組件名稱	拉伸彈簧 1
功 能	在卡片取出之同時，使 IC 卡之讀取頭裝置回位		
失效模式	1. 腐蝕生銹 2. 疲勞鬆弛		
失效原因	1. 安裝於潮濕之環境中 2. 彈簧長期使用，造成疲勞失效		
失效效應	1. 銹蝕造成彈力降低 2. IC 卡讀取頭無法正確回位而使其端子因與卡片提早接觸而磨損		
嚴重等級	1. 嚴重等級 III 2. 嚴重等級 II		
發生機率	1. D 2. C		
檢測方法	1. 目視檢驗 2. 定期檢視		
因應措施	1. 彈簧做耐腐蝕之表面處理 2. 預估壽命		

表 23 FMEA - 電磁閥

零件編號	24-16	零組件名稱	電磁閥
功 能	鎖住卡片之動力來源		
失效模式	無法推動連桿組以鎖住卡片		
失效原因	1. 線圈燒燬 2. 電源線斷裂 3. 連接器接觸不良		
失效效應	卡片資料未讀完，User 就可將卡片取出		
嚴重等級	1. 嚴重等級 III 2. 嚴重等級 III 3. 嚴重等級 III		
發生機率	1. D 2. D 3. D		
檢測方法	1. 定期檢視 2. 目視檢驗 3. 定期檢視		
因應措施	1. 定期檢視更換 2. 定期檢視 3. 製程品管		

表 24 FMEA - 連桿組 1

零件編號	24-17	零組件名稱	連桿組 1
功 能	因電磁閥的動作而推動連桿組 2		
失效模式	無法鎖住卡片		
失效原因	1. 推動連桿組 2 之滑動部磨損 2. 塑膠構架供連桿組 1 滑動定位軌道磨損		
失效效應	可能卡片資料未讀完，User 就可將卡片取出		
嚴重等級	嚴重等級 III		
發生機率	D		
檢測方法	定期檢視		
因應措施	1. 添加潤滑油脂減少磨損 2. 選用耐磨耗之塑膠材料		

表 25 FMEA - 連桿組 2

零件編號	24-18	零組件名稱	連桿組 2
功 能	因連桿組 1 之推動而鎖住卡片		
失效模式	無法鎖住卡片		
失效原因	滑動槽磨損		
失效效應	可能卡片資料未讀完，User 就可將卡片取出		
嚴重等級	嚴重等級 III		
發生機率	D		
檢測方法	定期檢視		
因應措施	添加潤滑油脂，以減少滑動槽磨損		

表 26 FMEA - 連桿定位銷

零件編號	24-19	零組件名稱	連桿定位銷
功 能	將連桿組 2 定位於塑膠構架之上		
失效模式	1. 脫落	2. 腐蝕生鏽	
失效原因	1. 鬆配合	2. 安裝於潮濕之環境中	
失效效應	連桿組 2 脫離，無法鎖住卡片，可能卡片資料未讀完，User 就可將卡片取出		
嚴重等級	1. 嚴重等級 III	2. 嚴重等級 III	
發生機率	1. D	2. D	
檢測方法	目視檢驗		
因應措施	1. 點膠固定、緊配合	2. 選用耐腐蝕之金屬材料或表面處理	

表 27 FMEA - 拉伸彈簧 2

零件編號	24-20	零組件名稱	拉伸彈簧 2
功 能	釋放卡片之動力來源，使連桿組 1 與連桿組 2 回位		
失效模式	1. 腐蝕生鏽	2. 疲勞鬆弛	
失效原因	1. 安裝於潮濕之環境中	2. 彈簧長期受力，造成疲勞失效	
失效效應	1. 鏽蝕造成彈力降低	2. 連桿組無法正確回位致使卡片無法取出	
嚴重等級	1. 嚴重等級 III	2. 嚴重等級 III	
發生機率	1. D	2. D	
檢測方法	1. 目視檢驗	2. 定期檢視	
因應措施	1. 彈簧做耐腐蝕之表面處理	2. 設計小的作動行程	

表 28 FMEA - 歸位桿

零件編號	24-21	零組件名稱	歸位桿
功 能	電磁閥裝置無法回位時，推動此桿可使其回位		
失效模式	脫落		
失效原因	因扣環脫落，致使歸位桿無法定位於塑膠構架上		
失效效應	電磁閥裝置無法回位時，卡片鎖住無法取出		
嚴重等級	嚴重等級 III		
發生機率	D		
檢測方法	目視檢驗		
因應措施	使扣環與歸位桿之定位柱呈緊配合嚙合，點膠固定		

表 29 FMEA - 扣環

零件編號	24-22	零組件名稱	扣環
功 能	將歸位桿浮扣在塑膠構架之定位柱上		
失效模式	脫落		
失效原因	與歸位桿之定位柱呈鬆配合		
失效效應	致使歸位桿脫落		
嚴重等級	嚴重等級 III		
發生機率	D		
檢測方法	目視檢驗		
因應措施	與歸位桿之定位柱呈緊配合嚙合，點膠固定		

表 30 FMEA - 介面電路板螺絲

零件編號	24-23	零組件名稱	介面電路板螺絲
功 能	將介面電路板鎖固在塑膠構架之上		
失效模式	1. 脫落 2. 腐蝕生鏽		
失效原因	1. 組裝不良、振動環境 2. 安裝於潮濕之環境中		
失效效應	介面電路板移位致使其微動開關 1 無法被偵測桿觸動而得知卡片是否出入		
嚴重等級	1. 嚴重等級 III 2. 嚴重等級 IV		
發生機率	1. D 2. D		
檢測方法	目視檢驗		
因應措施	1. 自攻螺絲鎖緊力量規範、點膠固定 2. 螺絲表層鍍鋅或鎳		

表 31 FMEA - 電子零件、連接器、電路板

零件編號	24-24	零組件名稱	電子零件、連接器、電路板
功 能	為連接器與信號傳輸處理之介面		
失效模式	1. 無法偵測卡片是否出入 2. 磁頭無法讀取磁條卡資料 3. IC 卡讀取頭無法讀取 IC 卡資料 4. 無法偵測卡片已到定位 5. 讀卡時，無法將卡片鎖住		
失效原因	1. 微動開關 1 失效 2. 連接器接觸不良 3. 相關電子零件失效		
失效效應	無法讀取卡片資料		
嚴重等級	1. 嚴重等級 III 2. 嚴重等級 III 3. 嚴重等級 IV		
發生機率	1. D 2. D 3. E		
檢測方法	定期檢視		
因應措施	1. 定期檢視更換 2. 製程品管、組裝規範 3. 定期檢視更換		

表 32 複合式讀卡機 FMEA 結果-1

零件名稱及編號	功能	失效模式	失效原因	失效影響			失效檢測方法	嚴重度等級	發生機率	綜合評定危害性	預防措施	備註
				局部影響	高一層次影響	最終影響						
IC 卡讀取頭(24-14)	讀取 IC 卡資料	無法讀取 IC 卡資料	讀取頭端子疲勞、讀取頭滑動部磨損	讀取頭端子與 IC 卡端子之接觸力降低	讀取動作不準確	讀取資料之可靠度低	定期檢視	II	C	2C	預估壽命	可靠度設計

表 33 複合式讀卡機 FMEA 結果-2

零件名稱及編號	功能	失效模式	失效原因	失效影響			失效檢測方法	嚴重度等級	發生機率	綜合評定危害性	預防措施	備註
				局部影響	高一層次影響	最終影響						
拉伸彈簧 1 (24-15)	使 IC 卡讀取頭裝置回位	疲勞鬆弛	長期使用	C 卡而磨損 讀取頭端子因提早接觸 I	讀取動作不準確	讀取資料之可靠度低	定期檢視	II	C	2C	預估壽命	可靠度設計

本文分析所得的關鍵性零件：IC 卡讀取頭端子與拉伸彈簧 1，他們承受週期應力，會因為疲勞而造成破斷，如果應力振幅越小則疲勞壽命越高，但是材料的性質存在著很多不確定的因素，所以材料的疲勞壽命常呈機率分佈。因此有必要預估疲勞壽命，在失效之前更換新零件，使複合式讀卡機能夠維持正常使用。關於改善方法，大多數機械零件均可藉由定期檢視、組裝規範、製程品管、材料改善、表面處理等因應措施獲得改善，以降低失效機率。然而工程上需要做改善的問題有三個特點：(1)該問題至少有一個以上的改善方法，(2)可以掌握與無法掌握的因素，(3)改善方法不同其改善成效會不同。因此，改善問題本身有它的不確定性與風險，因為問題的資訊有某種程度不確定性與問題的發生與否。若能根據失效事實擬定有關的改善方案會有較高的成功機率。對於提出的改善方法需評估執行後的預期效果，危害性評定指數是否下降，才能確認改善方法是符合預期的結果。

3.2 失效分析

3.2.1 彈簧失效

彈簧特性之指定通常為下列一至二項：

1. 指定長度時的荷重。

2. 指定荷重時的長度。

3. 彈簧常數。

彈簧在指定長度或指定荷重使用時，需在其荷重與變形量曲線圖之直線部份，否則會發生差異。且需在其彈性限度內使用，使得當荷重消除時，不殘留變形。彈簧的疲勞限度因平均應力與應力振幅的大小而變化，影響彈簧工作應力的因素：負荷形態、腐蝕效應、表面狀況、振動及衝力的效應、材料成分及熱處理等。彈簧失效模式包括：斷裂、變形、疲勞、鬆弛、磨損等。本文之 FMEA 結果以疲勞、變形為彈簧之主要失效模式，此因複合式讀卡機之工作條件、操作環境極為單純，端視 IC 卡讀取頭端子與拉伸彈簧 1 之使用次數多寡，以決定其疲勞壽命。

3.2.2 磨損

當兩表面間發生小的相對滑動時，會生成微細的磨耗碎屑，這種磨耗型式，稱為磨損磨耗(fretting wear)。複合式讀卡機之讀取頭組合的讀取動作為在 IC 卡插入的同時，它會在塑膠構架之軌道上因 IC 卡之推動而滑行達到靜態連結，如圖 15 所示，此讀取頭滑動部與塑膠構架之材料均為 PC + 20%GF + 少量 PTFE，此材料具有高硬度、耐摩耗之機械性質，可防止兩者之滑動接觸部份的磨損，可保持端子靜態連結之接觸力。當兩者之相對運動之接觸部份發生磨損時，讀取頭裝置之上升高度會降低，使得靜態連結之接觸力會降低，造成讀取資料之可靠度降低。

表示磨耗程度的簡明方法，可用被磨耗材料的體積損失或重量損失計算之。但用此種基礎作比較時，只限於形式與大小相同之組件。因並未考慮到接觸面積、滑動距離、磨擦力等因素。取單位滑動距離，在每單位接觸面積所移除的材料重量，為表示磨耗程度的一種較普遍方法，但此表示法不包括磨擦力，即

$$C = \frac{Q}{AL} \quad (3-1)$$

式中， C ：為每單位接觸面積所移除的材料重量

Q ：為移除的材料重量， A ：為接觸面積， L ：為滑動距離

3.2.3 疲勞與 S-N 曲線

機械各零件材料承受的荷重是變動荷重多於靜荷重，對材料反覆施加荷重時，即使其最大應力小於靜破壞應力，雖無永久變形，也會在達到某種反覆次數後破壞，此種現象稱為材料的疲勞。其程度取決於所加應力的平均值，但最依存於應力的振幅，彈簧的破斷常因此疲勞所致。影響彈簧疲勞強度之因子常因製造技術與使用環境等而變化[10]、[24]，例如：表面粗糙狀況、形狀之應力集中效果、尺寸效果、滲碳表面處理、預變形、珠擊、腐蝕、高溫等。而一般選用彈簧材料時，除應達成使用目的與機能之外，不可造成永久變形或折損。機械產品零組件於工作時，其所承受之應力包括靜應力及覆變應力，兩者顯示之力學物理變化並不相同。當受靜應力作用時，其破壞模式為塑性變形或脆性斷裂，其強度以材料之彈性極限、降伏強度或強度極限衡量；受覆變應力作用時，則將產生疲勞斷裂，其強度以材料之疲勞強度衡量。疲勞強度低於彈性極限、降伏強度等靜態負荷強度。

應力施加於材料做疲勞試驗時，平均應力 S_m 保持一定；改變應力振幅 S_a ，調查在各 S_a 下達到破壞的反覆次數 N ，在縱軸 S_a ，橫軸 $\log N$ 的圖上畫出它們的關係，則成圖 22[10]，此稱 S-N 曲線(應力—疲勞壽命曲線，或稱為疲勞曲線)，以表示平均值疲勞壽命與外加應力之間的關係，此曲線通常包括右降的傾斜線與水平線，在 $N=10^7$ 成為水平，在此水平線以下的應力振幅，反覆次數再多也不破壞，此水平線的應力稱為疲勞限度，傾斜線稱為時間強度曲線，兩者合稱疲勞強度。彈簧疲勞強度之驗證，應先探討彈簧所受交變應力之特性，如圖 23 所示，隨時間作周期性變化，受變化幅度之最大變應力 S_{\max} 及最小變應力 S_{\min} 作用，變應力振幅 $= S_a$ ，平均變應力 $= S_m$ ，則其數學關係如下：

$$\text{最大變應力： } S_{\max} = S_m + S_a \quad (3-2)$$

$$\text{最小變應力： } S_{\min} = S_m - S_a \quad (3-3)$$

$$\text{平均變應力： } S_m = (S_{\max} + S_{\min})/2 \quad (3-4)$$

$$\text{變應力振幅： } S_a = (S_{\max} - S_{\min})/2 \quad (3-5)$$

$$\text{變應力比例： } r = S_{\min}/S_{\max} = (S_m - S_a)/(S_m + S_a) \quad (3-6)$$

r 表示變應力之變化性質， $S_a = 0$ ， $r = -1$ ，稱為完全反向覆變應力；

$S_{\min} = 0$ ， $S_a = S_m$ ， $r = 0$ ，稱為循環拉伸變應力； $S_{\max} = S_{\min}$ ， $S_a = 0$ ， $r = +1$ ，稱為靜應力。變應力比例 r 、變應力振幅 S_a 及循環次數 N ，對彈簧之疲勞壽命均有影響。彈簧在同一最大應力水準時， r 值越大，或 S_a 越小，或 N 越少，其疲勞壽命越高。疲勞壽命的估算一般以疲勞損傷累積法則 Palmgren-Miner's Rule 進行比較與推定，其概念在於疲勞破壞是元件或材料內部之損傷是逐漸累積，至累積一定程度就發生疲勞斷裂。因此材料的疲勞特性無法由其機械性質推論，而必須直接實驗量測得到 S-N 曲線方能推定。若能再用機率理論以顯示具有各種形式之機率分佈特性及量化數值，此有助於可靠度分析。

S-N 曲線(疲勞曲線)：

$$NS^m = C \quad 10^3 \leq N \leq 10^6 \quad (3-7)$$

式中， m 與 C 為經驗常數，其值由試驗獲得。上式兩端取對數，則 $\text{Log } N + m\text{Log } S = \text{Log } C$

令 $Y = \text{Log } N$ ， $X = \text{Log } S$ ， $a = \text{Log } C$ ， $b = -m$ ，可得

$$Y = a + bX \quad (3-8)$$

S-N 曲線是從固定應力振幅疲勞試驗中得到，若能實驗取得之多組數據 S (應力)與 N (壽命次數)，可求得最小平方和之迴歸直線 $Y = a + bX$ (best-fit straight line)，由其 a 、 b 值，可求得 m 、 C 值，將其代入，可得疲勞曲線方程式 $NS^m = C$ 。

3.2.4 鬆弛

彈簧是利用其彈性復原，彈簧材料發生永久變形的界限以內可視為可用的最大應力，亦即可視彈性限度為最大使用應力；通常以平均應力考慮靜荷重所致之變形。靜荷重長時間作用，需考慮潛變或應力鬆弛現象，潛變乃在定荷重下，經長時間後，會產生永久變形；應力鬆弛係在一定應變下，放置長時間後，荷重減低之現象，兩者起因於相同理由。應力鬆弛現象，如圖 24 所示，當應力為 σ_1 時，其應變為 ϵ_1 ，如保持應變為 ϵ_1 不變，

則維持 ε_1 所需應力隨時間延長而由 σ_1 下降至 σ_2 。彈簧鬆弛率是以彈簧試驗之前與之後的負載損失百分比表示，其值越小表示彈簧之抗應力鬆弛能力越好。因此彈簧之應力鬆弛與其負荷有關，壓應力愈大，鬆弛率愈大。因此當 IC 卡讀取頭的端子產生應力鬆弛時，其與 IC 卡端子接合時之接觸力會降低，造成讀取資料之可靠度降低。複合式讀卡機在正常使用狀況下，不會將卡片留置其內，因此彈簧不至於發生應力鬆弛現象。

彈簧之應力鬆弛現象發生的原因很多，主要是由於下列四種因素：

1. 溫度升高

溫度升高使材料產生膨脹及軟化，因此彈簧的彈性限度減低。例如回火彈簧線，在靜態負荷時，耐溫在 115 至 170 間。

2. 負荷增加

如果負荷增加的時間過長，則彈簧產生鬆弛的現象。

3. 疲勞限度

當材料有瑕疵裂縫時，在振動中易生疲勞。如果材料超過臨界點時，則彈簧將會失去彈性。

4. 內應力

當彈簧在捲製或熱處理過程中，材料組織受到破壞、而產生不平衡的內應力。



3.2.5 卡片失效

卡片失效為外在因素，也可能造成複合式讀卡機之失效，當讀卡機失效時，需先確認是否為卡片失效，以釐清問題。由於卡片失效的狀況過於複雜，此因對於卡片的持有者難以規範如何保管與操作卡片，故本文暫不研究分析卡片。僅將造成卡片失效的可能原因概述如下。

1. 機械性失效：例如變形、磨損、刮痕、溫度變化等均屬之。卡片儘量保持平整，避免折損扭曲造成磁條或晶片的破損或剝離而無法讀取資料。因此，喜歡把錢包放在後褲袋的人，需小心不要把卡片坐彎、坐壞，卡片變形可能造成 IC 卡讀取頭端子 over loading，使得工作應力振幅增大而影響 IC 卡讀取頭端子的疲勞壽命。正常刷卡情況之下，卡片會產生磨損與刮痕，因此卡片有使用壽命限制。避免因溫度的激烈變化造成晶片熱漲冷縮而失效。關於卡片於循環負載下之黏彈力學分析可參考林佑信

[25]的研究，卡片使用時影響壽命的最大主因乃受力點之向下位移量。

2. 電子性失效：例如靜電破壞、消磁等均屬之。IC卡避免過度磨擦晶片造成靜電破壞。磁條卡由於有磁條設計，應該遠離電磁設備以免消磁，分析磁條是否被(部分)消磁，可用磁卡磁域顯示劑，乃將極微細鐵粉與揮發性極高的有機溶劑(HCHC 141B)混合，然後噴在磁條上，由於鐵粉在有機溶劑尚未揮發掉之前，可以受到磁條上磁場吸引而自由移動排列，而形成依磁條上磁場分佈的特定圖案，以判定是否消磁。
3. 其它：例如髒污、錄碼不良等均屬之。IC卡晶片表面如果因汗水而出現氧化現象或受油漬、灰塵等污染，以致讀取訊號不良，則可用無塵布沾少量酒精擦拭晶片表面髒污處，再以無塵布擦拭即可。磁條卡的錄碼不良，是因為寫卡(Encoding)時，造成磁條上的磁性正負轉變規律性的變異程度大，若此張磁卡的錄碼格式越不規律與磁場訊號不够強，越不利於讀卡機正確的判讀磁條資料(Decoding)。

由上述探討卡片失效的可能原因可知，在正常使用卡片的情況下，由於卡片會被磨損與產生刮痕，所以卡片產生機械性失效的機率較高。

3.2.6 複合式讀卡機之失效的處理方式與潛在問題

現在金融交易產業對於複合式讀卡機之失效的處理模式大致可分為故障修理與預防保養等兩類。

1. 故障修理：如果卡片交易失效無法讀取卡片資料時，可立即派當地技術人員立即維修或將複合式讀卡機拆下送回製造廠修理，雖然製造廠可以由其失效模式找尋失效原因，進而做設計變更改善可靠度，但是成本往往過高，不符經濟效益，也使得商家卡片金融交易停止而被抱怨。
2. 預防保養：定期派人員做好維護工作，按時清潔、點檢、潤滑與更換零件等，此法雖然可以降低失效機率，但是程序往往流於形式，無法達到預期效果，對於可靠度的提升有限。

上述兩種的失效的處理模式，對於近來履履要求提升讀卡機的金融交易安全性，使得讀卡機的可維修性變得越耗費時間或設計成為不可維修，欲解決此問題，唯有在設計期間對於失效模式與效應做深入的分析、探討與改善存在系統中的風險因子，以提升複合式讀卡機的「固有可靠度」才是根本方法，並將分析資料文件化以達到經驗累積與傳承的成果。

四、可靠度分析方法

現今有關產品可靠度的定義，一般多以 1952 年由美國國防部所成立的電子裝備可靠度顧問小組(Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment; AGREE)針對電子裝備可靠度問題進行研究所獲得的結論為基礎。此小組所賦予可靠度之定義為：可靠度為產品於既定的時間內，在特定的使用(環境)條件下，執行特定性能或功能，成功達成工作目標的機率。由此定義可看出可靠度是由「功能」、「使用條件」、「時間」及「成功機率」等四個要素所組成。在這四個要素中，以「成功機率」為產品可靠度的量化指標，「功能」、「使用條件」或「時間」等均為隨機變數。

在世界上，幾乎所有的物理量都存在著某種程度的變異性，且隨著材料的幾何形狀、材料性質和外環境等因素導致失效的過程具有隨機性，可靠度理論為此而發展出來，使得在工程分析上，有一個計量的表示方式。一般而言，可靠度愈高，代表系統正常運作的機率愈高。在評估系統之可靠度時，首先要明確定義何種情況下系統是屬於失效狀態，此失效模式確定了，就可以由可靠度理論分析得知系統在特定條件下的可靠度。

4.1 強度－應力干涉理論

當著眼於供給與需求之干涉關係，可靠度可經由強度-應力干涉理論(Strength-Stress Interference; SSI)分析求得，亦即失效的產生是系統所負荷的應力(需求)超過系統所能提供的強度(供給)所致。所稱「應力」係指廣義者，不僅指外力、內應力，且包括各種環境因素，如溫度、腐蝕…等，凡能阻止結構或零件失效之因素，統稱為強度，如材料之機械性能、製造工藝、加工精度、尺寸…等，所稱「強度」係指機械結構承受上述「應力」之能力。當應力大於強度時，產品便會失效[26]，如圖 25 所示。由於實務上不可能製造出兩件完全一樣的產品，而且在實際使用時亦無法保證產品所受應力均為相同，因此，應力與強度都會隨機變化[8]，其分佈的形狀和位置亦會隨時間改變。當強度較弱的產品與較重的應力發生干擾時就會發生失效。事實上，強度並非永遠具有固定平均數值，例如當零件發生疲勞或腐蝕現象時，強度分佈將會隨著時間或反覆的負荷應用而變動。在數理統計上，可靠度是條件機率問題，特別強調初始條件及操作過程的環境條

件，此兩條件若其中之一不同，即使是同一個產品，所表現之可靠度亦不盡相同。

定義隨機變數：

$$X = \text{強度(供給條件)}$$

$$Y = \text{應力(需求條件)}$$

當 $X > Y$ 時，系統為安全；若 $X < Y$ 時，系統即發生失效。則可靠度 R 可表示為：

$$\begin{aligned} R &= P(\text{強度} > \text{應力} | \text{環境}) \\ &= P(X > Y) = P(X - Y > 0) \end{aligned} \quad (4-1)$$

而在工程設計上將強度 X 與應力 Y 視為一定值或呈機率分佈，如圖 26 至圖 29 所示。如圖 27 所示，可靠度可表示為：


$$R = P(X > Y) = \int_0^x f_y(y) dy \quad (4-2)$$

如圖 28 所示，可靠度可表示為：

$$R = P(X > Y) = \int_y^{\infty} f_x(x) dx = 1 - \int_0^y f_x(x) dx \quad (4-3)$$

如圖 29 所示，假設 X 與 Y 均為機率分佈，而其累積分佈函數 $F_x(x)$ ， $F_y(y)$ 與機率密度函數 $f_x(x)$ ， $f_y(y)$ 為已知。則根據強度－應力干涉理論，可靠度可表示為：

$$R = P(X > Y) = \iint f_{X,Y}(x,y) dx dy \quad (4-4)$$

其中 $f_{X,Y}(x,y)$ 為 X 與 Y 之聯合機率密度函數(Joint Probability Density Function)。應力大於強度時之失效機率 F 可計算如下：

$$F = 1-R = P(X < Y) = \sum_{\text{all } y} P(X < Y | Y = y) \cdot P(Y = y) \quad (4-5)$$

如果 X 與 Y 互為統計獨立，且為連續隨機變數時，其可靠度可表示為

$$\begin{aligned} R &= \int dR = \int_{-\infty}^{\infty} f_Y(y) \left[\int_y^{\infty} f_X(x) dx \right] dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_Y(y) [1 - F_X(y)] dy \end{aligned} \quad (4-6)$$

若由應力(需求)觀點視之，其可靠度可表示為

$$\begin{aligned} R &= \int dR = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) \left[\int_{\infty}^x f_Y(y) dy \right] dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) F_Y(x) dx \end{aligned} \quad (4-7)$$

兩機率分佈之間所重疊的區域，為失效發生的區域，稱為強度-應力干涉區域。所以，只要知道隨機變數 X 與 Y 的機率分佈，便可用上述的式子計算可靠度。經由有效運用統計技術，確實掌握強度(Strength)與應力(Stress)的變化情形，再透過完整的設計程序與品質改進，以確保研製產品的可靠度水準。

若隨機變數 X 、 Y 為常態分佈，令 $Z=X-Y$ ；則 Z 亦為常態分佈，設其平均值為 μ_Z ，標準差為 σ_Z

$$\text{則} \quad \mu_Z = \mu_X - \mu_Y \quad (4-8)$$

若 X 與 Y 相互為統計獨立

$$\text{則} \quad \sigma_Z = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} \quad (4-9)$$

當 $Z > 0$ 時，表示安全。當 $Z < 0$ 時，表示失效。當 $Z = 0$ 時，為極限狀態，

如超出此一狀態，便無法滿足某一特定要求而造成失效，以 $Z=X-Y$ 表示者，即為極限狀態方程式(Limit State Equation)。用以描述產品強度與所承擔之應力的設計變數很多，一般是以產品強度與使用時所承受之應力的關係式來描述，此關係稱之為產品的性能函數(Performance Function)。在考慮多設計變數的情形下，且設計變數均為其他多個基本設計隨機變數的函數，產品之性能函數 $g(X)$ 可定義為

$$g(X) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4-10)$$

其中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 代表由產品基本設計變數所構成的向量，此等設計均可能為時間之函數，亦即 $X = X(t)$ 。如圖 30 所示， $g(X) = 0$ 代表產品之供需處於平衡之臨界狀態(強度等於應力)，在此狀態之性能函數稱為極限狀態方程式(Limit State Equation)或稱失效面；當 $g(X) > 0$ 時，表示產品處於安全狀態，反之 $g(X) < 0$ 則為失效狀態。當臨界狀態 $g(X) = 0$ 遠離或接近原點時，安全區域 $g(X) > 0$ 會相對增加或減少，因此，相對於原點的 $g(X) = 0$ 之位置可決定產品的安全性或可靠度，其位置可用 $g(X) = 0$ 距離原點的最短變量(距離)來表示，此最短距離可定義為可靠度指標(Reliability Index) β 。

可靠度 R 為強度 X 與應力 Y 之差的機率，即

$$R = P_s = P(Z > 0) = P(X - Y > 0) \quad (4-11)$$

失效機率：

$$F = P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z - \mu_z}{\sigma_z}\right)^2\right] dz \quad (4-12)$$

次將變數常態分佈標準化(standardize)，即平均值 $\mu = 0$ ，標準差 $\sigma = 1$ ，以計算可靠度。

$$\text{令 } v = \frac{Z - \mu_z}{\sigma_z}, \quad \text{則 } dZ = \sigma_z dv$$

$$\therefore P_f = \int_{-\infty}^{\frac{\mu_z}{\sigma_z}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2}{2}} dv = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) \quad (4-13)$$

$$\text{上式中, } \beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}} \quad (4-14)$$

$$\text{可靠度: } R = 1 - P_f = \Phi(\beta) \quad (4-15)$$

式中 β 稱為可靠度指標(Reliability Index)，符號 Φ 為標準常態累積分佈函數(cumulative distribution function)，可查常態分佈數值表，求得 β 對應之可靠度 R 值。

4.2 力矩近似法(Generalized second moment)

欲計算產品的失效機率，須事先獲得機率密度函數或其聯合機率密度函數，但此項資料常無法獲得或不足。即使所需之機率分佈資料已確定，仍需進行繁重之積分工作以估算可靠度。通常所獲得的資料或數據僅能計算一次矩與二次矩，即計算個別隨機變數之平均值與變異數。產品可靠度的估算必為此一次矩與二次矩的函數。

二次矩法就是用泰勒(Taylor)級數展開求隨機變數之平均值與標準差，進而求得原點至失效面的最短距離，此最短距離可定義為可靠度指標(Reliability Index) β 。隨機變數 X 之函數 $f(X)$ 較複雜時， X 之平均值與標準差難以計算，可利用 Taylor 級數展開以得到近似解。當考慮各隨機變數為統計獨立及常態分佈之特性下，可靠度可表示為

$$R = 1 - \Phi(-\beta) \quad (4-16)$$

在探討隨機變數時，期望值(Expected Value)與變異數(Variance)是最常被用來描述隨機變數之特徵的兩個量值。期望值 $E[X]$ 表示隨機變數的平均值，變異數 $Var[X]$ 表示隨機變數與期望值之間的變異情形，兩者分別定義如下：

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f_X(x) dx \quad (4-17)$$

$$Var[X] = E[(X - \mu_X)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_X)^2 f_X(x) dx \quad (4-18)$$

上式 $\mu_X = E[X]$ 。此外衡量隨機變數間的變異情形，可以用標準差 σ (Standard Deviation) 表示，定義如下：

$$\sigma_X = \sqrt{Var[X]} \quad (4-19)$$

一維隨機變數函數 $Y = f(X)$ ，其在 $X = \mu$ (即平均值) 處，做泰勒級數展開：

$$Y = f(X) = f(\mu) + (X - \mu) \left. \frac{df}{dX} \right|_{X=\mu} + \frac{(X - \mu)^2}{2!} \left. \frac{d^2 f}{dX^2} \right|_{X=\mu} + \dots \quad (4-20)$$

對上式取期望值，得：

$$E[Y] \approx f(\mu) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 f}{dX^2} \right|_{X=\mu} \cdot Var[X] \quad (4-21)$$

上式已將級數展開式中之餘項略去。如 $Var[X]$ 很小，則第二項可省略，得：

$$E[Y] \approx E[f(X)] \approx f(\mu) \quad (4-22)$$

對(4-20)式取變異數，得：

$$Var[Y] \approx Var[f(\mu)] + Var[(X - \mu) \left. \frac{df}{dX} \right|_{X=\mu} + \dots] \approx \left[\left. \frac{df}{dX} \right|_{X=\mu} \right]^2 \cdot Var[X] \quad (4-23)$$

性能函數為線性變化之二次矩公式(Second Moment Formulation)時，參考 Ang & Tang[4]之推導。 n 維隨機變數函數 $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ，其 X_1, X_2, \dots, X_n 在各別 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ (即各隨機變數之平均值) 處，做泰勒級數展開：

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ = f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_i) \left. \frac{\partial f}{\partial X_i} \right|_{X=\mu} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (X_i - \mu_i)(X_j - \mu_j) \left. \frac{\partial^2 f}{\partial X_i \partial X_j} \right|_{X=\mu}$$

$$+\dots\dots (4-24)$$

為獲得線性化方程式，上式僅取一次項，二項式之後省略，得：

$$E[Y] \approx f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_i) \frac{\partial^2 f}{\partial X_i^2} \Big|_{X=\mu} \cdot Var[X_i] \quad (4-25)$$

$$Var[Y] \approx \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{X=\mu} \right]^2 \cdot Var[X_i] \quad (4-26)$$

運用上述式子計算期望值 $E[X]$ 與變異數 $Var[X]$ ，即可求得隨機變數 X 之平均值 μ 與標準差 σ 。據以獲得可靠度指標 β ，再查標準常態分佈函數數值表而得對應之可靠度 R 。

4.3 常態分佈函數

若變數值的改變沒有特定規則且不與時序相關，吾人稱為隨機變數。離散變數是指變數所屬集合內的數據均為離散數值。隨機變數的型式一般可以分為離散隨機變數 (Discrete Random Variables) 和連續隨機變數 (Continuous Random Variables) 兩種型式，依此可依所屬隨機變數的型式區分機率分佈函數。屬於連續隨機變數的機率分佈函數有常態分佈函數 (Normal Distribution Function)、對數常態分佈函數 (Log-normal Distribution Function)、韋伯分佈函數 (Weibull Distribution Function)。

常態分佈又稱為高斯分佈 (Gaussian Distribution)，在自然界中多數的物理性質在沒有特定因子影響下均接近此種分佈。令 X 為常態分佈函數的隨機變數，則機率密度函數表示為

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad -\infty \leq x \leq \infty \quad (4-27)$$

其中兩個參數， μ 為隨機變數之平均值 (或稱位置參數，此因 μ 影響圖形的位置)， σ 為隨機變數之標準差 (或稱尺度參數， σ 愈大表示圖形散的愈開)。

常態分佈函數呈一鐘形曲線變化，而其對稱軸線為平均值 μ 。若令 $Z=(X-\mu)/\sigma$ ，此由 X 至 Z 的變換稱為將 X 標準化，此時為 $\mu=0, \sigma=1$ 的常態分佈，稱為「標準常態分佈累積分佈函數」，以 $\Phi(x)$ 符號表示之。

常態分佈累積分佈函數如下：

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(v)dv = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{v-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dv \quad (4-28)$$

常態分佈可靠度函數如下：

$$R(x) = 1 - F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{v-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dv \quad (4-29)$$

(4-28)式轉化為標準常態分佈型式 Φ ：

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (4-30)$$

$$\therefore R(x) = 1 - F(x) = 1 - \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (4-31)$$

對(4-30)式取反函數，可得

$$\Phi^{-1}(F) = \frac{1}{\sigma}x - \frac{\mu}{\sigma} \quad (4-32)$$

上式整理為直線斜截式如下：

$$x = \sigma\Phi^{-1}(F) + \mu \quad (4-33)$$

以 $\Phi^{-1}(F)$ 為橫座標， x 為縱座標，將數據繪入常態分佈函數的機率圖

紙內，如數據服從常態分佈，則各數據點將呈一直線，利用最小平方法(the least-squares fitting of the data)可 fit 該一直線，此直線斜率為標準差 σ ，與縱座標的截距為平均值 μ ，代入(4-31)即可計算可靠度值。



五、力學分析

IC 卡讀取頭端子的功能在連接 IC 卡時提供接觸介面上的正向接觸力，從而達到傳遞訊號目的，因此，IC 卡讀取頭與 IC 卡之間的訊號傳遞品質高低與該端子疲勞壽命可靠度之良窳有決定性的影響，亦會牽動整個讀卡機的運作品質。如圖 19 所示為 IC 卡讀取頭八個端子之外觀與排列方式，當 IC 卡插入後與形狀類似板彈簧之讀取頭端子相連結，為計算其變位值，首先在實驗部份求出 IC 卡讀取頭端子與 IC 卡的彈簧常數，然後彈簧常數代入力學分析，計算卡片插入後的讀取頭端子之變位，以估算端子之工作應力振幅，做為後續分析端子的疲勞壽命可靠度之用。

5.1 彈簧常數

在本節將使用實驗方式求出 IC 卡讀取頭端子與 IC 卡的彈簧常數，作為下節力學理論計算分析變位之用。

5.1.1 IC 卡讀取頭端子的彈簧常數

彈簧常數 K 值量測如圖 31 所示，將 IC 卡讀取頭端子置放於由大理石平台支撐之平行塊上面，游標高度規記錄端子變位量，推拉力計量測荷重。在端子為自由高與推拉力計接觸但無施加荷重情況下，此時將游標高度規與推拉力計均歸零，然後游標高度規下降的距離即表示端子變位量，而推拉力計的指示量即為荷重。依序記錄測試樣品在游標高度規不同之下下降的距離與推拉力計相對產生之荷重，然後繪出變位量與荷重關係圖，其直線的斜率即為彈簧常數 K ，如圖 32 所示，可知端子變位量於 1.2mm 以下時，變位量與荷重呈線性關係，彈簧常數 K 之平均值為 76.02 g/mm、標準差為 2.0859 g/mm。

由實驗所得 IC 卡讀取頭端子的彈簧常數 K 之平均值為 76.02 g/mm，其值代入懸臂樑變位公式計算可得楊式係數 E 為 8703.822 kg/mm²。其中，板厚為 0.6mm、板寬為 0.3mm、懸臂長為 7.74mm。

5.1.2 IC 卡的彈簧常數

如圖 33 所示，IC 卡與讀取頭端子連結後，IC 卡類似一簡支樑，IC 卡之彈簧常數 K 值量測方法如圖 34 所示，相關測試方法同前，繪出卡片荷重與變位關係圖如圖 35 所示，其直線的斜率即為彈簧常數 K ，彈簧常數 K 之平均值為 152.36 g/mm ，標準差為 1.8877 g/mm ，代入(5-2)式計算得到楊式係數 E 為 268.804 kg/mm^2 。其中，卡片測試跨距 l 為 58 mm ，卡片厚 h 為 0.8 mm 、卡片寬 b 為 53.99 mm ， I 為斷面二次矩。

$$\text{簡支樑變位} \quad \delta = Pl^3/48EI \quad (5-1)$$

$$\text{簡支樑楊式係數} \quad E = Kl^3/4bh^3 \quad (5-2)$$

5.2 理論計算分析

在本節吾人將運用材料力學計算在 IC 卡操作使用時之 IC 卡讀取頭端子的變位，以估算端子之工作應力振幅。如圖 33 為 IC 卡與讀取頭端子連結之後的相關位置和作用力，計算變位如下，

右側四個端子並聯，變位為

$$\delta_1 = \frac{P_1}{4K_1} \quad (5-3)$$

已知如圖 36 簡支樑承受集中負荷的變位為

$$\delta = \frac{PBx}{6EIL}(L^2 - B^2 - x^2) \quad 0 \leq x \leq A \quad (5-4)$$

$$\delta = \frac{PA(L-x)}{6EIL}(2Lx - x^2 - A^2) \quad A \leq x \leq L \quad (5-5)$$

在彈性限度內，樑的變位和負荷為線性的關係。此意謂著，在不同負荷同時作用下，樑的變位可以各別負載獨立作用時，所產生的變位，重疊相加

而得，此法即謂之重疊原理。因此，由圖 36 簡支樑的變位與重疊原理可知圖 33 之卡片位置 1 變位為

$$\delta_{1''} = \frac{a}{6E_2I_2L_2} [P_2b(L_2^2 - a^2 - b^2) + 2P_1a(L_2 - a)^2] \quad (5-6)$$

左側四個端子並聯，變位為

$$\delta_{2'} = \frac{P_2}{4K_1} \quad (5-7)$$

卡片位置 2 變位，由重疊原理推導可知

$$\delta_{2''} = \frac{b}{6E_2I_2L_2} [P_1a(L_2^2 - a^2 - b^2) + 2P_2b(L_2 - b)^2] \quad (5-8)$$

總變位量

$$\delta_{\text{total}} = \delta_{\text{端子}} + \delta_{\text{卡片}} \quad (5-9)$$

其中，端子的材質為磷青銅，板厚 h_1 ：0.3mm、板寬 b_1 ：0.6mm、懸臂長 L_1 ：7.74mm、彈簧常數 K_1 ：76.02 g/mm(前節實驗數據)。

卡片數據

板厚 h_2 ：0.8mm

板寬 b_2 ：53.99mm

兩設計支點距離 L_2 ：54.56mm

楊氏係數 E_2 ：268.804kg/mm²(前節實驗計算數據)

右端子與支點距離 a ：6.71mm

左端子與支點距離 b ：40.23mm

利用本節上述公式計算即可求得在 IC 卡作用下，讀取頭端子承受垂直向下的接觸作用力時，IC 卡與讀取頭端子各別實際之變位量與荷重值。將(5-3)與(5-6)、(5-7)與(5-8)式代入(5-9)式，已知設計總變位量為 0.7mm，代入相關數據聯立解得負荷 P_1 值為 133.67g、負荷 P_2 值為 70.98g，可知右側單一端子之負荷值 33.417g 大於左側單一端子之負荷值 17.745g，因此可

知右側端子變位較大，致使它的工作應力振幅較大而使得疲勞壽命較短，此因 IC 卡在該位置距離右側支點位置較近，使得 IC 卡在該位置變位較小而導致右側端子變位較大。

5.3 分析結果

IC 卡的材質為 PVC，因為呈板片狀，所以在實際操作與 IC 卡讀取頭端子接觸時，在接觸點會承受一垂直力致使 IC 卡與端子均彎曲變形，由計算分析知道右側端子的負荷值 P_1 較大，所以變位較大，致使右側端子的的工作應力振幅較大而疲勞壽命比左側端子為短，因此 IC 卡讀取頭端子之疲勞壽命可靠度分析之對象為右側端子，並將上述計算所得右側端子負荷值與實驗所得彈簧常數代入(5-3)式，計算得到右側端子的變位為 0.4395mm，供後續可靠度評估之用。



六、實驗與可靠度評估

6.1 前言

在第三章實施複合式讀卡機的失效模式與效應分析所得的結果，將危害讀卡機可靠度最嚴重之拉伸彈簧 1 與 IC 卡讀取頭端子做相關實驗與可靠度評估。可靠度評估的必要性在於設計者往往無法對所有可能引起失效的原因，鉅細靡遺面面俱到地都考慮周全，並且提供可靠度設計之壽命預測參考數據，對於材料、強度、加工方法、結構型式或成本等，進行選擇、調整、驗證、檢討或改進之評估。此外，材料的破壞常因疲勞所致，疲勞限度取決於所加的平均應力及應力振幅，並且常耗時實驗收集數據建立 S-N 曲線，再用機率理論以量化疲勞壽命之可靠度，有別於此，本文建構三種破壞準則以探討拉伸彈簧與 IC 卡讀取頭端子疲勞壽命之可靠度。

6.2 破壞準則

可靠度是指不失效的機率，因此需要明確定義何種情況下是屬於失效狀態，此失效狀態確定了，就可以建立極限狀態方程式，並藉由可靠度計算方法得知在特定條件下之材料疲勞壽命的可靠度。

6.2.1 破壞準則一：疲勞應力小於工作應力振幅

1. 拉伸彈簧

如圖 37 之拉伸彈簧，撓度源自於彈簧螺旋部的扭曲，使得彈簧荷重在彈簧螺旋部的線材表面造成最大剪應力，當彈簧疲勞剪應力 τ_e 小於彈簧在工作時施加之剪應力振幅 τ_a ，將造成彈簧的疲勞破壞，由此建立極限狀態方程式

$$\tau_e - \tau_a = 0 \quad (6-1)$$

將 τ_e 與 τ_a 示意於圖 38 的 SN 曲線圖內，若 τ_e 與 τ_a 符合常態分佈，則 τ_e 大於 τ_a 的可靠度

$$P_S(\tau_e > \tau_a) = \Phi\left(\frac{\bar{\tau}_e - \bar{\tau}_a}{\sqrt{\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2}}\right) \quad (6-2)$$

2. IC 卡讀取頭端子

如圖 39 之 IC 卡讀取頭端子，端子的變位源自於 IC 卡插到定位後迫使端子接觸點向下變位，使得荷重在端子固定端造成最大彎曲應力，當疲勞彎曲應力 S_e 小於端子在工作時施加之彎曲應力振幅 S_a ，將造成端子的疲勞破壞，由此建立極限狀態方程式

$$S_e - S_a = 0 \quad (6-3)$$

若 S_e 與 S_a 符合常態分佈，則 S_e 大於 S_a 的可靠度

$$P_S(S_e > S_a) = \Phi\left(\frac{\bar{S}_e - \bar{S}_a}{\sqrt{\sigma_{S_e}^2 + \sigma_{S_a}^2}}\right) \quad (6-4)$$

6.2.2 破壞準則二：安全因數小於 1

如圖 40 所示為 Goodman Diagram，通常利用此圖計算機件之安全因數 F_S ，橫座標為平均剪應力 τ_m ，縱座標為剪應力振幅 τ_a ，直線 DE 為塑性變形線，直線 AB 為 Goodman Curve (古德曼曲線)，亦稱為斷裂線，它用抗剪強度 τ_{su} 當做破壞標準，為壽命一百萬次之等壽命線，古德曼曲線之安全因數，乃視工作線為原點 O 與工作應力點 (τ_m, τ_a) 之連線，可知直線 OG 其上之 τ_m 與 τ_a 的比值為定值，若 τ_m 與 τ_a 皆乘以 F_S 之後，將落在古德曼曲線 AB 上。當工作應力點在直線 AB 外側，則料件疲勞壽命小於一百萬次，當工作應力點在區域 OBCD 內，則料件將永不產生塑性變形，亦永不斷裂，為安全之工作區域，其疲壽命大於一百萬次。應用上圖計算拉伸彈簧的安全因數，應用圖 41 計算 IC 卡讀取頭端子的安全因數，其橫座標為平均彎曲應力 S_m ，縱座標為彎曲應力振幅 S_a 。

在傳統疲勞設計中，材料在疲勞壽命限下其強度與材料所承受最大週期應力之比值定義為安全因數，此值常藉由 Goodman Diagram 估算，由上述方法求得之安全因數為一常數，此常數化的作法不符實際需要，因強度

與應力均為隨機變數，故安全因數亦為隨機變數，使得機件設計即使具有相同之安全因數但是可靠度變化很大。當 F_S 大於 1 時，表示安全，當 F_S 小於 1 時，表示失效。由此建立極限狀態方程式

$$F_S - 1 = 0 \quad (6-5)$$

若安全因數 F_S 符合常態分佈，則安全因數 F_S 大於 1 的可靠度

$$P_S(F_S > 1) = \Phi\left(\frac{\overline{F_S} - 1}{\sigma_{F_S}}\right) \quad (6-6)$$

6.2.3 破壞準則三：工作應力點與 Goodman 失效面的距離小於 0

如圖 42 所示為 Goodman Diagram，圖中 H 與 H' 各別表示工作應力點 F、f 和直線 AB、直線 CD 之距離，亦即與失效面(即 limit state equation) 之距離。當距離 H 小於 0 即表示工作應力點落在線 AB 外側，當距離 H 大於 0 即表示工作應力點落在區域 OBCD 內，其疲勞壽命大於一百萬次。應用上圖計算拉伸彈簧的工作應力點與 Goodman 失效面的距離，應用圖 43 計算 IC 卡讀取頭端的工作應力點與 Goodman 失效面的距離。由此建立極限狀態方程式

$$H = 0 \quad (6-7)$$

若工作應力點與失效面的距離 H 符合常態分佈，則工作應力點與失效面的距離 H 大於 0 之可靠度

$$P_S(H > 0) = \Phi\left(\frac{\overline{H}}{\sigma_H}\right) \quad (6-8)$$

6.3 實驗數據與計算分析

6.3.1 彈簧相關計算公式

1. 拉伸彈簧

拉伸彈簧的材質為 SUS304，拉伸荷重作用於螺旋的軸線上，計算

拉伸彈簧拉伸量、彈簧常數與剪應力之關係式如下：

$$\text{拉伸彈簧拉伸量} \quad \delta = \frac{8nD^3}{d^4G} B \quad (6-9)$$

$$\text{拉伸彈簧之彈簧常數} \quad K = \frac{B}{\delta} = \frac{d^4G}{8nD^3} \quad (6-10)$$

$$\text{拉伸彈簧於螺旋內側之最大剪應力} \quad \tau = k \frac{8D}{\pi d^3} B \quad (6-11)$$

$$\text{其中，} k = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0.615}{c} \quad (6-12)$$

式中之 B 為負載荷重， n 為螺旋有效圈數， d 為線徑， D 為平均螺旋直徑， G 為剪彈性係數， k 為瓦爾的應力修正係數， c 為彈簧指數 ($c=D/d$)。

2. IC 卡讀取頭端子

端子材質為磷青銅，端子外觀形狀為板彈簧。計算端子變位、彈簧常數與彎曲應力之關係式如下：

$$\text{端子變位量} \quad \delta = \frac{Bl^3}{3EI} \quad (6-13)$$

$$\text{端子之彈簧常數} \quad K = \frac{B}{\delta} = \frac{3EI}{l^3} \quad (6-14)$$

$$\text{端子之彎曲應力} \quad S = \frac{My}{I} \quad (6-15)$$

式中之 B 為負載荷重， E 為楊式係數， I 為斷面二次矩， M 為彎矩， y 為到中立軸的距離， l 為懸臂長， b 為板寬， h 為板厚。

6.3.2 彈簧常數 K 值與靜態拉伸強度試驗

1. 拉伸彈簧的彈簧常數 K 值試驗

量測彈簧常數之目的為彈簧在不同的拉伸量之下，可量測得到荷

重，繪出拉伸量與荷重關係圖，其直線的斜率即為彈簧常數 K ，並以(6-10)式計算得到剪彈性係數 G ，以供後續之相關數據分析計算使用。

量測設備：

大理石平台：600x455x105mm

Vertex 平行塊：10x30x100mm – 2 片，5x16x100 – 2 片

Mitutoyo 電子式游標高度規：300mm，精度 0.01mm

IMADA (Model:DPRSX-0.5TR) 電子式推拉力計：500gf，精度 0.1gf

量測方法：

拉伸彈簧之彈簧常數 K 值量測如圖 44 所示，游標高度規記錄彈簧拉伸量，推拉力計量測彈簧拉伸力。量測時拉伸彈簧一端固定不動，另一端勾掛在推拉力計的彎勾上，在拉伸彈簧為自由長與推拉力計接觸但無施加荷重情況下，此時將游標高度規與推拉力計均歸零，然後游標高度規上升的距離即表示拉伸彈簧拉伸量，而推拉力計的指示量即為荷重。依序記錄測試樣品在游標高度規不同之上升的距離與推拉力計相對產生之荷重，然後繪出拉伸量與荷重關係圖，其直線的斜率即為彈簧常數 K ，如圖 45 所示，可知拉伸彈簧之拉伸量於 15mm 以下時，拉伸量與荷重呈線性關係，彈簧常數 K 之平均值為 10.932g/mm、標準差為 0.2148 g/mm，代入(6-10)式計算得到剪彈性係數 G 。

2. 靜態拉伸強度試驗

(1) 拉伸彈簧

參考 CNS 金屬材料拉伸試片規格之 9 號試樣以製作十個拉伸彈簧之不銹鋼線材(SUS 304)的拉伸試驗試片，尺寸如圖 46，樣品與夾具如圖 47，並利用 MTS 拉伸試驗機進行拉伸試驗，設定各項參數，記錄起始絕對位置，速率為 0.01mm/sec，限定最大位移 50mm，每隔 0.05 秒擷取一次拉力值與絕對位置值，直到試片斷裂，拉伸試驗曲線如圖 48 所示，取得最大荷重與降伏點之值，該值除以線徑為 0.23mm 之彈簧試片的原始斷面積可求得彈簧材料之抗拉強度 S_{ult} 與降伏應力 S_{yp} ，兩者之數據關係大致呈

$$S_{yp} = 0.75S_{ult} \quad (6-16)$$

為簡化問題暫不考慮應力集中(修正)因素等等因素之下，材料機械性質有下列關係經驗式[20]：

$$\tau_{yp} = 0.5S_{yp} \quad (\text{最大剪應力理論}) \quad (6-17)$$

$$\tau_{su} = 0.67S_{ult} \quad (\text{螺旋彈簧經驗式}) \quad (6-18)$$

$$S_e = 0.5S_{ult} \quad (\text{鋼材}) \quad (6-19)$$

$$\tau_e = 0.5S_e \quad (\text{最大剪應力理論}) \quad (6-20)$$

由上述式子可推知：

$$\tau_{yp} = 0.375S_{ult} \quad (6-21)$$

$$\tau_e = 0.25S_{ult} \quad (6-22)$$

其中， S_{yp} 為降伏應力， S_{ult} 為抗拉強度， τ_{yp} 為剪降伏強度， τ_{su} 為抗剪強度， S_e 為疲勞限應力， τ_e 為疲勞限剪應力。

由上述式子觀察可知，只要能夠得知材料之抗拉強度 S_{ult} ，則 τ_{yp} 、 τ_e 數值可藉由(6-21)、(6-22)求出，繪製 Goodman 圖計算可靠度。

(2) IC 卡讀取頭端子

依 CNS 金屬材料拉伸試片規格之 5 號試樣以製作十個磷青銅板材之拉伸試驗試片，尺寸如圖 49，樣品如圖 50，並利用 MTS 拉伸試驗機進行拉伸試驗直到試片斷裂，拉伸試驗曲線如圖 51 所示，取得最大荷重與降伏點之值，該值除以試片原始斷面積 $25 \times 0.3 \text{mm}$ ，可求得彈簧材料之抗拉強度 S_{ult} 與降伏應力 S_{yp} ，兩者之數據關係大致呈

$$S_{yp} = 0.9S_{ult} \quad (6-23)$$

為簡化問題暫不考慮應力集中(修正)因素等等因素，如圖 52[28]所示為磷青銅材料(銅合金)之疲勞限應力 S_e 與抗拉強度 S_{ult} 的關係近似值，

$$S_e = 0.375S_{ult} \quad (6-24)$$

由上述式子可知，只要能夠得知材料之抗拉強度 S_{ult} ，則 S_{yp} 、 S_e 之數值可藉由(6-23)、(6-24)求出，繪製 Goodman 圖計算可靠度。

6.3.3 計算相關參數值

1. 拉伸彈簧

拉伸彈簧於正常工作操作拉伸量 δ 為 5mm，因為是定值拉伸故其標準差 σ_δ 為 0，自由長 L 為 8.46mm。此外，用精度 0.01mm 之游標卡尺量測十個拉伸彈簧之彈簧線徑 d ，其實測結果與設計值 0.23mm 相同，因此其尺寸公差取設計經驗值 $3\sigma_D=0.01$ 。平均螺旋直徑 D 經量測十個拉伸彈簧然後計算其平均值與標準差。有效圈數 n 之設計值為 12.25 圈，因是用彈簧專用機製造，有效圈數 n 之製造誤差難以用儀器量測，故公差取設計經驗值 $3\sigma_n=1/12$ 圈。以上實驗與量測所得數值，計算相關參數之平均值與標準差，整理列示如表 34 以供計算引用。

為計算破壞準則一：彈簧疲勞剪應力小於工作剪應力振幅之可靠度，由(6-22)式得疲勞剪應力 τ_e 之平均值與變異數

$$\overline{\tau_e} = 0.25\overline{S_{ult}} \quad (6-25)$$

$$\sigma_{\tau_e}^2 \Big|_{X=\mu} = \left(\frac{\partial \tau_e}{\partial S_{ult}} \right)^2 \sigma_{S_{ult}}^2 = 0.0625\sigma_{S_{ult}}^2 \quad (6-26)$$

拉伸彈簧是由自由長之狀態施予拉伸，可知平均剪應力 τ_m 等於剪應力振幅 τ_a 。由(6-9)、(6-11)、(6-12)式，可得工作剪應力振幅 τ_a 的平均值為

$$\tau_a \Big|_{X=\mu} = \frac{G\delta}{8\pi n} \cdot \frac{4D^2d + 1.46Dd^2 - 2.46d^3}{D^3(D-d)} \quad (6-27)$$

當平均剪應力 τ_m 等於 0，等壽命的剪應力振幅 τ_a 可由圖 53 與三角形相似定理可推導得到，並計算平均值與變異數

$$\tau_a \Big|_{X=\mu} = \frac{G\delta S_{ult} d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)}{8\pi n S_{ult} D^3(D-d) - 1.4925G\delta d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)} \quad (6-28)$$

$$\sigma_{\tau_a}^2|_{x=\mu} = \left(\frac{\partial \tau_a}{\partial d}\right)^2 \sigma_d^2 + \left(\frac{\partial \tau_a}{\partial D}\right)^2 \sigma_D^2 + \left(\frac{\partial \tau_a}{\partial G}\right)^2 \sigma_G^2 + \left(\frac{\partial \tau_a}{\partial \delta}\right)^2 \sigma_\delta^2 + \left(\frac{\partial \tau_a}{\partial n}\right)^2 \sigma_n^2 + \left(\frac{\partial \tau_a}{\partial S_{ult}}\right)^2 \sigma_{S_{ult}}^2 \quad (6-29)$$

其中，

$$\frac{\partial \tau_a}{\partial d}|_{x=\mu} = \frac{8\pi m G \delta S_{ult}^2 D^3 [(D-d)(4D^2 + 2.92Dd - 7.38d^2) + d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)]}{[8\pi m S_{ult} D^3 (D-d) - 1.4925G\delta d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)]^2} \quad (6-30)$$

$$\frac{\partial \tau_a}{\partial D}|_{x=\mu} = \frac{8\pi m G \delta S_{ult}^2 d D^2 [D(D-d)(8D + 1.46d) - (4D - 3d)(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)]}{[8\pi m S_{ult} D^3 (D-d) - 1.4925G\delta d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)]^2} \quad (6-31)$$

$$\frac{\partial \tau_a}{\partial G}|_{x=\mu} = \frac{8\pi m \delta S_{ult}^2 d D^3 (D-d)(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)}{[8\pi m S_{ult} D^3 (D-d) - 1.4925G\delta d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)]^2} \quad (6-32)$$

$$\frac{\partial \tau_a}{\partial \delta}|_{x=\mu} = \frac{8\pi m G S_{ult}^2 d D^3 (D-d)(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)}{[8\pi m S_{ult} D^3 (D-d) - 1.4925G\delta d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)]^2} \quad (6-33)$$

$$\frac{\partial \tau_a}{\partial n}|_{x=\mu} = \frac{-8\pi G \delta S_{ult}^2 d D^3 (D-d)(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)}{[8\pi m S_{ult} D^3 (D-d) - 1.4925G\delta d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)]^2} \quad (6-34)$$

$$\frac{\partial \tau_a}{\partial S_{ult}}|_{x=\mu} = \frac{-1.4925G^2 \delta^2 d^2 (4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)^2}{[8\pi m S_{ult} D^3 (D-d) - 1.4925G\delta d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)]^2} \quad (6-35)$$

為計算破壞準則二：安全因數 F_s 小於 1 之可靠度，首先需判斷拉伸彈簧之工作應力 (τ_m, τ_a) 在 Goodman Diagram 之位置，此可由圖 40 工作應力點 F 與原點 O 連線之直線斜率大於或小於直線 OC 之斜率判斷。點 C 的座標值 (τ_m, τ_a) 求解可由直線 AB 與直線 DE 之兩直線的截距式著手，

$$\overline{AB} \text{ 之截距式為 } \frac{\tau_m}{\tau_{su}} + \frac{\tau_a}{\tau_e} = 1 \quad , \text{ 並將(6-18)與(6-22)式代入可化簡得}$$

$$\tau_m + 2.68\tau_a - 0.67S_{ult} = 0 \quad (6-36)$$

$$\overline{DE} \text{ 之截距式為 } \frac{\tau_m}{\tau_{yp}} + \frac{\tau_a}{\tau_{yp}} = 1 \quad , \text{ 並將(6-21)式代入可化簡得}$$

$$\tau_m + \tau_a - 0.375S_{ult} = 0 \quad (6-37)$$

由(6-36)與(6-37)式，可聯立解得點 C 的座標值為 $(0.1994S_{ult}, 0.1756S_{ult})$ 。拉伸彈簧是由自由長之狀態施予拉伸，故可知 τ_m 等於 τ_a ，使得直

線斜率 $m_{OF} > m_{OC}$ ，可得知拉伸彈簧之工作應力點 F 接近直線 AB，依三角形相似定理，可得安全因數

$$\frac{1}{F_s} = \frac{\tau_m}{\tau_{su}} + \frac{\tau_a}{\tau_e} \quad (6-38)$$

將(6-18)與(6-22)式代入上式，可推算得

$$F_s = \frac{0.1675S_{ult}}{0.25\tau_m + 0.67\tau_a} \quad (6-39)$$

將(6-27)式代入上式，且 $\tau_m = \tau_a$ ，可得安全因數 F_s 的平均值與變異數為

$$F_s|_{x=\mu} = \frac{1.4566S_{ult}\pi n}{G\delta} \cdot \frac{D^3(D-d)}{4D^2d + 1.46Dd^2 - 2.46d^3} \quad (6-40)$$

$$\sigma_{F_s}^2|_{x=\mu} = \left(\frac{\partial F_s}{\partial d}\right)^2 \sigma_d^2 + \left(\frac{\partial F_s}{\partial D}\right)^2 \sigma_D^2 + \left(\frac{\partial F_s}{\partial G}\right)^2 \sigma_G^2 + \left(\frac{\partial F_s}{\partial \delta}\right)^2 \sigma_\delta^2 + \left(\frac{\partial F_s}{\partial n}\right)^2 \sigma_n^2 + \left(\frac{\partial F_s}{\partial S_{ult}}\right)^2 \sigma_{S_{ult}}^2 \quad (6-41)$$

其中，

$$\frac{\partial F_s}{\partial d}|_{x=\mu} = \frac{-1.4566S_{ult}\pi n}{G\delta} \cdot \frac{(4D^6 + 2.92D^5d - 8.84D^4d^2 + 4.92D^3d^3)}{d^2(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)^2} \quad (6-42)$$

$$\frac{\partial F_s}{\partial D}|_{x=\mu} = \frac{1.4566S_{ult}\pi n}{G\delta} \cdot \frac{(8D^5 + 0.38D^4d - 12.76D^3d^2 + 7.38D^2d^3)}{d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)^2} \quad (6-43)$$

$$\frac{\partial F_s}{\partial G}|_{x=\mu} = \frac{-1.4566S_{ult}\pi n}{G^2\delta} \cdot \frac{D^3(D-d)}{d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)} \quad (6-44)$$

$$\frac{\partial F_s}{\partial \delta}|_{x=\mu} = \frac{-1.4566S_{ult}\pi n}{G\delta^2} \cdot \frac{D^3(D-d)}{d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)} \quad (6-45)$$

$$\frac{\partial F_s}{\partial n}|_{x=\mu} = \frac{1.4566S_{ult}\pi}{G\delta} \cdot \frac{D^3(D-d)}{d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)} \quad (6-46)$$

$$\frac{\partial F_s}{\partial S_{ult}}|_{x=\mu} = \frac{1.4566\pi n}{G\delta} \cdot \frac{D^3(D-d)}{d(4D^2 + 1.46Dd - 2.46d^2)} \quad (6-47)$$

為計算破壞準則三：工作應力點 F 與 Goodman 失效面的距離小於 0 之可靠度，由圖 42 判斷拉伸彈簧之工作應力點 F 在 Goodman Diagram 之位置，其方式同前，可知工作應力點 F 接近直線 AB 失效面。

已知 點 (x_1, y_1) 與直線 $ax+by+c=0$ 之距離為

$$\frac{|ax_1 + by_1 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (6-48)$$

工作應力點 (τ_m, τ_a) 與 Goodman 失效面的距離 H 由(6-36)式可得

$$H = 0.3496|\tau_m + 2.68\tau_a - 0.67S_{ult}| \quad (6-49)$$

因工作應力點 F 位於直線 AB 之下方區域，故 $H < 0$ ，兩者距離 H 由 (6-49)式可知為

$$H = -0.3496(\tau_m + 2.68\tau_a - 0.67S_{ult}) \quad (6-50)$$

將(6-27)式代入上式，且 $\tau_m = \tau_a$ ，可得工作應力點 F 與 Goodman 失效面的距離 H 之平均值與變異數為

$$H|_{x=\mu} = -\frac{0.1608G\delta}{\pi n} \cdot \frac{4D^2d + 1.46Dd^2 - 2.46d^3}{D^3(D-d)} + 0.2342S_{ult} \quad (6-51)$$

$$\sigma_H^2|_{x=\mu} = \left(\frac{\partial H}{\partial d}\right)^2 \sigma_d^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial D}\right)^2 \sigma_D^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial G}\right)^2 \sigma_G^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \delta}\right)^2 \sigma_\delta^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial n}\right)^2 \sigma_n^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial S_{ult}}\right)^2 \sigma_{S_{ult}}^2 \quad (6-52)$$

其中，

$$\frac{\partial H}{\partial d}|_{x=\mu} = \frac{-0.1608G\delta}{\pi n} \cdot \frac{4D^3 + 2.92D^2d - 8.84Dd^2 + 4.92d^3}{D^3(D-d)^2} \quad (6-53)$$

$$\frac{\partial H}{\partial D}|_{x=\mu} = \frac{-0.1608G\delta}{\pi n} \cdot \frac{-8D^3d - 0.38D^2d^2 + 12.76Dd^3 - 7.38d^4}{D^4(D-d)^2} \quad (6-54)$$

$$\frac{\partial H}{\partial G}|_{x=\mu} = \frac{-0.1608\delta}{\pi n} \cdot \frac{4D^2d + 1.46Dd^2 - 2.46d^3}{D^3(D-d)} \quad (6-55)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial \delta} \right|_{X=\mu} = \frac{-0.1608G}{\pi n} \cdot \frac{4D^2d + 1.46Dd^2 - 2.46d^3}{D^3(D-d)} \quad (6-56)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial n} \right|_{X=\mu} = \frac{0.1608G\delta}{\pi n^2} \cdot \frac{4D^2d + 1.46Dd^2 - 2.46d^3}{D^3(D-d)} \quad (6-57)$$

$$\frac{\partial H}{\partial S_{ult}} = 0.2342 \quad (6-58)$$

可靠度指標 β 對設計參數之敏感度分析計算，由(6-2)、(6-28)、(6-29)式計算拉伸彈簧疲勞剪應力 τ_e 大於工作剪應力振幅 τ_a 的可靠度指標 β 對設計參數偏微分與利用鏈鎖律，可得設計參數對可靠度指標 β 之敏感度

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial d} \right|_{X=\mu} = \frac{-1}{\sqrt{\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2}} \cdot \frac{\partial \tau_a}{\partial d} - \frac{\overline{\tau_e} - \overline{\tau_a}}{2\sqrt{(\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2)^3}} \cdot \frac{\partial \sigma_{\tau_a}^2}{\partial d} \quad (6-59)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial D} \right|_{X=\mu} = \frac{-1}{\sqrt{\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2}} \cdot \frac{\partial \tau_a}{\partial D} - \frac{\overline{\tau_e} - \overline{\tau_a}}{2\sqrt{(\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2)^3}} \cdot \frac{\partial \sigma_{\tau_a}^2}{\partial D} \quad (6-60)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial G} \right|_{X=\mu} = \frac{-1}{\sqrt{\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2}} \cdot \frac{\partial \tau_a}{\partial G} - \frac{\overline{\tau_e} - \overline{\tau_a}}{2\sqrt{(\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2)^3}} \cdot \frac{\partial \sigma_{\tau_a}^2}{\partial G} \quad (6-61)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial \delta} \right|_{X=\mu} = \frac{-1}{\sqrt{\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2}} \cdot \frac{\partial \tau_a}{\partial \delta} - \frac{\overline{\tau_e} - \overline{\tau_a}}{2\sqrt{(\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2)^3}} \cdot \frac{\partial \sigma_{\tau_a}^2}{\partial \delta} \quad (6-62)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial n} \right|_{X=\mu} = \frac{-1}{\sqrt{\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2}} \cdot \frac{\partial \tau_a}{\partial n} - \frac{\overline{\tau_e} - \overline{\tau_a}}{2\sqrt{(\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2)^3}} \cdot \frac{\partial \sigma_{\tau_a}^2}{\partial n} \quad (6-63)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial S_{ult}} \right|_{X=\mu} = \frac{0.25}{\sqrt{\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2}} - \frac{1}{\sqrt{\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2}} \cdot \frac{\partial \tau_a}{\partial S_{ult}} - \frac{\overline{\tau_e} - \overline{\tau_a}}{2\sqrt{(\sigma_{\tau_e}^2 + \sigma_{\tau_a}^2)^3}} \cdot \frac{\partial \sigma_{\tau_a}^2}{\partial S_{ult}} \quad (6-64)$$

由(6-6)、(6-40)、(6-41)式計算拉伸彈簧安全因數 F_S 大於 1 的可靠度指標 β 對設計參數偏微分與利用鏈鎖律，可得設計參數對可靠度指標 β 之敏感度

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial d} \right|_{X=\mu} = \frac{1}{\sigma_{F_S}} \cdot \frac{\partial F_S}{\partial d} - \frac{\overline{F_S} - 1}{\sigma_{F_S}^2} \cdot \frac{\partial \sigma_{F_S}}{\partial d} \quad (6-65)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial D} \right|_{X=\mu} = \frac{1}{\sigma_{F_S}} \cdot \frac{\partial F_S}{\partial D} - \frac{\overline{F_S} - 1}{\sigma_{F_S}^2} \cdot \frac{\partial \sigma_{F_S}}{\partial D} \quad (6-66)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial G} \right|_{X=\mu} = \frac{1}{\sigma_{F_S}} \cdot \frac{\partial F_S}{\partial G} - \frac{\overline{F_S} - 1}{\sigma_{F_S}^2} \cdot \frac{\partial \sigma_{F_S}}{\partial G} \quad (6-67)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial \delta} \right|_{X=\mu} = \frac{1}{\sigma_{F_S}} \cdot \frac{\partial F_S}{\partial \delta} - \frac{\overline{F_S} - 1}{\sigma_{F_S}^2} \cdot \frac{\partial \sigma_{F_S}}{\partial \delta} \quad (6-68)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial n} \right|_{X=\mu} = \frac{1}{\sigma_{F_S}} \cdot \frac{\partial F_S}{\partial n} - \frac{\overline{F_S} - 1}{\sigma_{F_S}^2} \cdot \frac{\partial \sigma_{F_S}}{\partial n} \quad (6-69)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial S_{ult}} \right|_{X=\mu} = \frac{1}{\sigma_{F_S}} \cdot \frac{\partial F_S}{\partial S_{ult}} - \frac{\overline{F_S} - 1}{\sigma_{F_S}^2} \cdot \frac{\partial \sigma_{F_S}}{\partial S_{ult}} \quad (6-70)$$

由(6-8)、(6-51)、(6-52)式計算拉伸彈簧工作應力點與失效面的距離 H 大於 0 的可靠度指標 β 對設計參數偏微分與利用鏈鎖律，可得設計參數對可靠度指標 β 之敏感度

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial d} \right|_{X=\mu} = \frac{1}{\sigma_H} \cdot \frac{\partial H}{\partial d} - \frac{\overline{H}}{\sigma_H^2} \cdot \frac{\partial \sigma_H}{\partial d} \quad (6-71)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial D} \right|_{X=\mu} = \frac{1}{\sigma_H} \cdot \frac{\partial H}{\partial D} - \frac{\overline{H}}{\sigma_H^2} \cdot \frac{\partial \sigma_H}{\partial D} \quad (6-72)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial G} \right|_{X=\mu} = \frac{1}{\sigma_H} \cdot \frac{\partial H}{\partial G} - \frac{\overline{H}}{\sigma_H^2} \cdot \frac{\partial \sigma_H}{\partial G} \quad (6-73)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial \delta} \right|_{X=\mu} = \frac{1}{\sigma_H} \cdot \frac{\partial H}{\partial \delta} - \frac{\overline{H}}{\sigma_H^2} \cdot \frac{\partial \sigma_H}{\partial \delta} \quad (6-74)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial n} \right|_{X=\mu} = \frac{1}{\sigma_H} \cdot \frac{\partial H}{\partial n} - \frac{\overline{H}}{\sigma_H^2} \cdot \frac{\partial \sigma_H}{\partial n} \quad (6-75)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial S_{ult}} \right|_{X=\mu} = \frac{1}{\sigma_H} \cdot \frac{\partial H}{\partial S_{ult}} - \frac{\overline{H}}{\sigma_H^2} \cdot \frac{\partial \sigma_H}{\partial S_{ult}} \quad (6-76)$$

2. IC 卡讀取頭端子

IC 卡讀取頭端子於第五章力學分析結果其工作變位為 0.4395mm，工作變位 δ 為定值變位，故變位標準差 σ_δ 為 0。端子自由高 H 為 7.0mm，懸臂長 l 為 7.74mm，其尺寸公差取設計經驗值 $3\sigma_l = 0.10$ 。板

寬 0.6mm 與板厚 0.3mm，其尺寸公差均取設計經驗值 $3\sigma=0.02$ 。以上實驗與量測所得數值，計算相關參數之平均值與標準差，整理列示如表 35 以供計算引用。

為計算破壞準則一：疲勞應力小於工作應力振幅之可靠度，由(6-24)式得疲勞應力 S_e 之平均值與變異數

$$\overline{S_e} = 0.375\overline{S_{ult}} \quad (6-77)$$

$$\sigma_{S_e}^2 \Big|_{X=\mu} = \left(\frac{\partial S_e}{\partial S_{ult}} \right)^2 \sigma_{S_{ult}}^2 = 0.1406\sigma_{S_{ult}}^2 \quad (6-78)$$

IC 卡讀取頭端子是從自由高之狀態施予變位，可知平均彎曲應力 S_m 等於彎曲應力振幅 S_a 。由(6-13)、(6-15)式，可得工作彎曲應力振幅 S_a 之平均值為

$$S_a \Big|_{X=\mu} = \frac{3E\delta h}{4l^2} \quad (6-79)$$



當平均彎曲應力 S_m 等於 0，等壽命的彎曲應力振幅 S_a 可由圖 54 與三角形相似定理可推導得到，並計算平均值與變異數

$$S_{a'} \Big|_{X=\mu} = \frac{3E\delta h S_{ult}}{4l^2 S_{ult} - 3E\delta h} \quad (6-80)$$

$$\sigma_{S_{a'}}^2 \Big|_{X=\mu} = \left(\frac{\partial S_{a'}}{\partial E} \right)^2 \sigma_E^2 + \left(\frac{\partial S_{a'}}{\partial h} \right)^2 \sigma_h^2 + \left(\frac{\partial S_{a'}}{\partial l} \right)^2 \sigma_l^2 + \left(\frac{\partial S_{a'}}{\partial \delta} \right)^2 \sigma_\delta^2 + \left(\frac{\partial S_{a'}}{\partial S_{ult}} \right)^2 \sigma_{S_{ult}}^2 \quad (6-81)$$

其中，

$$\frac{\partial S_{a'}}{\partial E} \Big|_{X=\mu} = \frac{12\delta h l^2 S_{ult}^2}{(4l^2 S_{ult} - 3E\delta h)^2} \quad (6-82)$$

$$\frac{\partial S_{a'}}{\partial h} \Big|_{X=\mu} = \frac{12E\delta l^2 S_{ult}^2}{(4l^2 S_{ult} - 3E\delta h)^2} \quad (6-83)$$

$$\left. \frac{\partial S_{a'}}{\partial l} \right|_{X=\mu} = \frac{-24E\delta h l S_{ult}^2}{(4l^2 S_{ult} - 3E\delta h)^2} \quad (6-84)$$

$$\left. \frac{\partial S_{a'}}{\partial \delta} \right|_{X=\mu} = \frac{12Eh l^2 S_{ult}^2}{(4l^2 S_{ult} - 3E\delta h)^2} \quad (6-85)$$

$$\left. \frac{\partial S_{a'}}{\partial S_{ult}} \right|_{X=\mu} = \frac{-9E^2 \delta^2 h^2}{(4l^2 S_{ult} - 3E\delta h)^2} \quad (6-86)$$

為計算破壞準則二：安全因數 F_S 小於 1 之可靠度，由圖 41 判斷 IC 卡讀取頭端子之工作應力 (S_m, S_a) 在 Goodman Diagram 之位置，其方式同前，可知工作應力點 F 接近直線 AB。點 C 的座標值 (S_m, S_a) 求解可由直線 AB 與直線 DE 之兩直線的截距式著手，

\overline{AB} 之截距式為 $\frac{S_m}{S_{Sult}} + \frac{S_a}{S_e} = 1$ ，並將(6-24)式代入可化簡得

$$S_m + 2.666S_a - S_{ult} = 0 \quad (6-87)$$

\overline{DE} 之截距式為 $\frac{S_m}{S_{yp}} + \frac{S_a}{S_{yp}} = 1$ ，並將(6-23)式代入可化簡得

$$S_m + S_a - 0.9S_{ult} = 0 \quad (6-88)$$

由(6-87)與(6-88)式，可聯立解得點 C 的座標值為 $(0.83998S_{ult}, 0.06002S_{ult})$ 。IC 卡讀取頭端子是從自由高之狀態施予變位，故可知 S_m 等於 S_a ，使得直線斜率 $m_{\overline{OF}} > m_{\overline{OC}}$ ，可得知 IC 卡讀取頭端子之工作應力點 F 接近直線 AB，依三角形相似定理，且代入(6-24)式，可得安全因數

$$F_S = \frac{0.375S_{ult}}{0.375S_m + S_a} \quad (6-89)$$

將(6-79)式代入上式，且 $S_m = S_a$ ，可得安全因數 F_S 之平均值與變異數

$$F_S|_{X=\mu} = 0.3636 \frac{S_{ult} l^2}{E \delta h} \quad (6-90)$$

$$\sigma_{FS}^2|_{X=\mu} = \left(\frac{\partial F_S}{\partial E}\right)^2 \sigma_E^2 + \left(\frac{\partial F_S}{\partial h}\right)^2 \sigma_h^2 + \left(\frac{\partial F_S}{\partial l}\right)^2 \sigma_l^2 + \left(\frac{\partial F_S}{\partial \delta}\right)^2 \sigma_\delta^2 + \left(\frac{\partial F_S}{\partial S_{ult}}\right)^2 \sigma_{S_{ult}}^2 \quad (6-91)$$

其中，

$$\frac{\partial F_S}{\partial E}|_{X=\mu} = -0.3636 \frac{S_{ult} l^2}{E^2 \delta h} \quad (6-92)$$

$$\frac{\partial F_S}{\partial h}|_{X=\mu} = -0.3636 \frac{S_{ult} l^2}{E \delta h^2} \quad (6-93)$$

$$\frac{\partial F_S}{\partial l}|_{X=\mu} = 0.7272 \frac{S_{ult} l}{E \delta h} \quad (6-94)$$

$$\frac{\partial F_S}{\partial \delta}|_{X=\mu} = -0.3636 \frac{S_{ult} l^2}{E \delta^2 h} \quad (6-95)$$

$$\frac{\partial F_S}{\partial S_{ult}}|_{X=\mu} = 0.3636 \frac{l^2}{E \delta h} \quad (6-96)$$

為計算破壞準則三：工作應力點 F 與 Goodman 失效面的距離小於 0 之可靠度，由圖 43 判斷 IC 卡讀取頭端子之工作應力(S_m, S_a)在 Goodman Diagram 之位置，其方式同前，可知工作應力點 F 接近直線 AB 失效面。工作應力點(S_m, S_a)與 Goodman 失效面的距離 H 由(6-87)式可得

$$H = 0.3512|S_m + 2.666S_a - S_{ult}| \quad (6-97)$$

因工作應力點 F 位於直線 AB 之下方區域，故 $H < 0$ ，兩者距離 H 由(6-97)式可知為

$$H = -0.3512(S_m + 2.666S_a - S_{ult}) \quad (6-98)$$

將(6-99)式代入上式，且 $S_m = S_a$ ，可得工作應力點 F 與 Goodman 失效面的距離 H 之平均值與變異數為

$$H|_{x=\mu} = -0.9656 \cdot \frac{E\delta h}{l^2} + 0.3512 S_{ult} \quad (6-99)$$

$$\sigma_H^2|_{x=\mu} = \left(\frac{\partial H}{\partial E}\right)^2 \sigma_E^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial h}\right)^2 \sigma_h^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial l}\right)^2 \sigma_l^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \delta}\right)^2 \sigma_\delta^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial S_{ult}}\right)^2 \sigma_{S_{ult}}^2 \quad (6-100)$$

其中，

$$\frac{\partial H}{\partial E}|_{x=\mu} = -0.9656 \cdot \frac{\delta h}{l^2} \quad (6-101)$$

$$\frac{\partial H}{\partial h}|_{x=\mu} = -0.9656 \cdot \frac{E\delta}{l^2} \quad (6-102)$$

$$\frac{\partial H}{\partial l}|_{x=\mu} = 1.9312 \cdot \frac{E\delta h}{l^3} \quad (6-103)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \delta}|_{x=\mu} = -0.9656 \cdot \frac{Eh}{l^2} \quad (6-104)$$

$$\frac{\partial H}{\partial S_{ult}} = 0.3512 \quad (6-105)$$



可靠度指標 β 對設計參數之敏感度分析計算，由(6-4)、(6-80)、(6-81)式計算 IC 卡讀取頭端子疲勞彎曲應力 S_e 大於工作彎曲應力振幅 S_a 的可靠度指標 β 對設計參數偏微分與利用鏈鎖律，可得設計參數對可靠度指標 β 之敏感度

$$\frac{\partial \beta}{\partial h}|_{x=\mu} = \frac{-1}{\sqrt{\sigma_{S_e}^2 + \sigma_{S_a'}^2}} \cdot \frac{12E\delta l^2 S_{ult}^2}{(4l^2 S_{ult} - 3E\delta h)^2} - \frac{\bar{S}_e - \bar{S}_{a'}}{2\sqrt{(\sigma_{S_e}^2 + \sigma_{S_a'}^2)^3}} \cdot \frac{\partial \sigma_{S_a'}^2}{\partial h} \quad (6-106)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial l}|_{x=\mu} = \frac{1}{\sqrt{\sigma_{S_e}^2 + \sigma_{S_a'}^2}} \cdot \frac{24E\delta h l S_{ult}^2}{(4l^2 S_{ult} - 3E\delta h)^2} - \frac{\bar{S}_e - \bar{S}_{a'}}{2\sqrt{(\sigma_{S_e}^2 + \sigma_{S_a'}^2)^3}} \cdot \frac{\partial \sigma_{S_a'}^2}{\partial l} \quad (6-107)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial E}|_{x=\mu} = \frac{-1}{\sqrt{\sigma_{S_e}^2 + \sigma_{S_a'}^2}} \cdot \frac{12\delta h l^2 S_{ult}^2}{(4l^2 S_{ult} - 3E\delta h)^2} - \frac{\bar{S}_e - \bar{S}_{a'}}{2\sqrt{(\sigma_{S_e}^2 + \sigma_{S_a'}^2)^3}} \cdot \frac{\partial \sigma_{S_a'}^2}{\partial E} \quad (6-108)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \delta}|_{x=\mu} = \frac{-1}{\sqrt{\sigma_{S_e}^2 + \sigma_{S_a'}^2}} \cdot \frac{12Eh l^2 S_{ult}^2}{(4l^2 S_{ult} - 3E\delta h)^2} - \frac{\bar{S}_e - \bar{S}_{a'}}{2\sqrt{(\sigma_{S_e}^2 + \sigma_{S_a'}^2)^3}} \cdot \frac{\partial \sigma_{S_a'}^2}{\partial \delta} \quad (6-109)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial S_{ult}}|_{x=\mu} = \frac{0.375}{\sqrt{\sigma_{S_e}^2 + \sigma_{S_a'}^2}} + \frac{1}{\sqrt{\sigma_{S_e}^2 + \sigma_{S_a'}^2}} \cdot \frac{9E^2 \delta^2 h^2}{(4l^2 S_{ult} - 3E\delta h)^2} - \frac{\bar{S}_e - \bar{S}_{a'}}{2\sqrt{(\sigma_{S_e}^2 + \sigma_{S_a'}^2)^3}} \cdot \frac{\partial \sigma_{S_a'}^2}{\partial S_{ult}} \quad (6-110)$$

由(6-6)、(6-90)、(6-91)式計算 IC 卡讀取頭端子安全因數 F_S 大於 1 的可靠度指標 β 對設計參數偏微分與利用鏈鎖律，可得設計參數對可靠度指標 β 之敏感度

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial h} \right|_{X=\mu} = \frac{-0.3636}{\sigma_{F_S}} \cdot \frac{S_{ult} l^2}{E \delta h^2} - \frac{\overline{F_S} - 1}{\sigma_{F_S}^2} \cdot \frac{\partial \sigma_{F_S}}{\partial h} \quad (6-111)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial l} \right|_{X=\mu} = \frac{0.7272}{\sigma_{F_S}} \cdot \frac{S_{ult} l}{E \delta h} - \frac{\overline{F_S} - 1}{\sigma_{F_S}^2} \cdot \frac{\partial \sigma_{F_S}}{\partial l} \quad (6-112)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial E} \right|_{X=\mu} = \frac{-0.3636}{\sigma_{F_S}} \cdot \frac{S_{ult} l^2}{E^2 \delta h} - \frac{\overline{F_S} - 1}{\sigma_{F_S}^2} \cdot \frac{\partial \sigma_{F_S}}{\partial E} \quad (6-113)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial \delta} \right|_{X=\mu} = \frac{-0.3636}{\sigma_{F_S}} \cdot \frac{S_{ult} l^2}{E \delta^2 h} - \frac{\overline{F_S} - 1}{\sigma_{F_S}^2} \cdot \frac{\partial \sigma_{F_S}}{\partial \delta} \quad (6-114)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial S_{ult}} \right|_{X=\mu} = \frac{0.3636}{\sigma_{F_S}} \cdot \frac{l^2}{E \delta h} - \frac{\overline{F_S} - 1}{\sigma_{F_S}^2} \cdot \frac{\partial \sigma_{F_S}}{\partial S_{ult}} \quad (6-115)$$

由(6-8)、(6-99)、(6-100)式計算 IC 卡讀取頭端子工作應力點與失效面的距離 H 大於 0 的可靠度指標 β 對設計參數偏微分與利用鏈鎖律，可得設計參數對可靠度指標 β 之敏感度

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial h} \right|_{X=\mu} = \frac{-0.9656}{\sigma_H} \cdot \frac{E \delta}{l^2} - \frac{\overline{H}}{\sigma_H^2} \cdot \frac{\partial \sigma_H}{\partial h} \quad (6-116)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial l} \right|_{X=\mu} = \frac{1.9312}{\sigma_H} \cdot \frac{E \delta h}{l^3} - \frac{\overline{H}}{\sigma_H^2} \cdot \frac{\partial \sigma_H}{\partial l} \quad (6-117)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial E} \right|_{X=\mu} = \frac{-0.9656}{\sigma_H} \cdot \frac{\delta h}{l^2} - \frac{\overline{H}}{\sigma_H^2} \cdot \frac{\partial \sigma_H}{\partial E} \quad (6-118)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial \delta} \right|_{X=\mu} = \frac{-0.9656}{\sigma_H} \cdot \frac{E h}{l^2} - \frac{\overline{H}}{\sigma_H^2} \cdot \frac{\partial \sigma_H}{\partial \delta} \quad (6-119)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial S_{ult}} \right|_{X=\mu} = \frac{0.3512}{\sigma_H} \quad (6-120)$$

6.4 可靠度分析

產品的疲勞可靠度可以定義為在一定壽命下其材料疲勞強度能夠承受最大週期應力的機率，亦即以強度和應力做為產品可靠度模式之主要變

數與參數。當強度與應力均屬常態分佈時，其可靠度常以可靠度指標 β 值評估。

6.4.1 拉伸彈簧之可靠度分析

拉伸彈簧於正常工作操作拉伸量 δ 為 5mm，因為是定值拉伸故其標準差 σ_δ 為 0，利用表 34 相關數據，計算(6-25)、(6-26)、(6-28)、(6-29)式的結果代入(6-2)式可得到疲勞限剪應力 τ_e 大於工作剪應力振幅 τ_a 之可靠度指標 β 值。計算(6-40)、(6-41)式的結果代入(6-6)式可得到安全因數 F_S 大於 1 之 β 值。計算(6-51)、(6-52)式的結果代入(6-8)式可得到工作應力點與 Goodman 失效面的距離 H 大於 0 之 β 值。三種破壞準則之 β 值與 τ_a 、 F_S 、 H 性能函數對設計參數之敏感度之計算結果如表 36 所示，可知拉伸彈簧的基本設計變數若變化，則對於 τ_a 、 F_S 、 H 三個性能函數的影響如表內數據所示，觀察數據可知系統對於彈簧線徑 d 與平均螺旋直徑 D 之變化較敏感，為影響可靠度之重要因子，兩者對可靠度的影響呈相反趨勢。當彈簧線徑 d 增大則應力振幅 τ_a 增大，但是安全因素 F_S 、工作應力點與失效面的距離 H 均減少，亦即可靠度變小。當設計彈簧時，只要調整線徑 d 與平均螺旋直徑 D 兩個設計變數就能快速計算調整達到設計者想要滿足的可靠度。此外，比較數據可知三種破壞準則之 β 值相近似，但是以安全因數破壞準則之 β 值 11.78 最小，雖然較保守但失效機率仍甚低，當使用安全因數破壞準則做參數設計時，可使得拉伸彈簧疲勞壽命達到一百萬次之失效機率較低。

一般而言標準差愈大可靠度愈低。標準差表示隨機變數與期望值之間的變異情形。若標準差大仍能保持較高可靠度且滿足需求，表示隨機變數可設計較大公差以降低製造成本。現在將表 34 設計參數(d 、 D 、 G 、 n 、 S_{ult})之標準差取表內數據之 0.25, 0.75, 1.25, 1.75 倍代入相關式子計算三種破壞準則之 β 值如表 37，且繪圖如圖 55 所示，可知三種破壞準則之 β 值的變化趨勢一致且相近，當標準差取愈大則三種破壞準則之 β 值誤差較小，但當標準差取愈小則三種破壞準則之 β 值誤差稍大，其中仍以安全因數破壞準則之 β 值最小也最保守，於標準差為原先之 1.75 倍時， β 值仍高達 6.73，失效機率仍低。應用標準差對於可靠度影響之分析可將設計公差最佳化以達經濟效益。

6.4.2 IC 卡讀取頭端子之可靠度分析

IC 卡讀取頭端子於正常工作操作承受負荷 33.417g，變位為定值故變位標準差 σ_δ 為 0，利用表 35 相關數據，計算(6-77)、(6-78)、(6-80)、(6-81)式的結果代入(6-4)式可得到疲勞彎曲應力 S_e 大於工作彎曲應力振幅 S_a 之可靠度指標 β 值。計算(6-90)、(6-91)式的結果代入(6-6)式可得到安全因數 F_S 大於 1 之 β 值。計算(6-99)、(6-100)式的結果代入(6-8)式可得到工作應力點與 Goodman 失效面的距離 H 大於 0 之 β 值。三種破壞準則之 β 值與 S_a 、 F_S 、 H 性能函數對設計參數之敏感度之計算結果如表 38 所示，可知 IC 卡讀取頭端子的基本設計變數若變化，則對於 S_a 、 F_S 、 H 三個性能函數的影響如表內數據所示，觀察數據可知系統對於板厚 h 與懸臂長 l 之變化較敏感，為影響可靠度之重要因子，兩者對可靠度的影響呈相反趨勢。當彈簧板厚 h 增大則應力振幅 S_a 增大，但是安全因素 F_S 、工作應力點與失效面的距離 H 均減少，亦即可靠度變小。當設計彈簧時，只要調整板厚 h 與懸臂長 l 兩個設計變數就能快速計算調整達到設計者想要滿足的可靠度。此外，比較數據可知三種破壞準則之 β 值以安全因數破壞準則之 β 值 2.01 最小，其可靠度查表可知為 0.977784，雖然其值較保守但失效機率為 2.2216%，當使用安全因數破壞準則做參數設計時，可使得 IC 卡讀取頭端子疲勞壽命達到一百萬次之失效機率較低。

將表 35 設計參數(h 、 l 、 E 、 S_{ult})之標準差取表內數據之 0.25, 0.75, 1.25, 1.75 倍代入相關式子計算三種破壞準則之 β 值如表 39，且繪圖如圖 56 所示，可知三種破壞準則之 β 值的變化趨勢極為一致，當標準差取愈大則三種破壞準則之 β 值誤差較小，但當標準差取愈小則三種破壞準則之 β 值誤差稍大，其中仍以安全因數破壞準則之 β 值最小也最保守，於標準差為原先之 1.75 倍時， β 值為 1.15，失效機率約 12.5072%。

6.5 可靠度設計

一般而言，可靠度設計所面對的問題主要包括：(1)決定能滿足性能之設計構想，(2)確立符合「使用中不發生失效」的可靠度設計。此須就各細部設計構想執行可靠度設計分析，進行擇優設計，以獲得具最佳可靠度水準之產品設計。產品設計的最佳手段是由影響產品功能或品質的參數著手，直接由各個設計參數與變數進行分析後，訂定最佳的設計參數值[5]。

6.5.1 拉伸彈簧之可靠度設計

現在假設可靠度為 0.9999，意即每一萬個僅一個發生失效，查常態分佈數值表可知可靠度指標 $\beta=3.72$ ，而且變數標準差給予調整，在平均螺旋直徑的設計值為 2.5mm 時計算彈簧線徑，在彈簧線徑的設計值為 0.23mm 時計算平均螺旋直徑，其數據可由(6-2)、(6-6)、(6-8)等相關式子計算解得，整理數據如表 40 與表 41、圖 57 與圖 58，可知在彈簧平均螺旋直徑設計值不變時，欲維持原有可靠度則設計參數之標準差愈大而彈簧線徑值愈小，以較小的拉伸荷重即可達到相同拉伸量。若在彈簧線徑設計值不變時，欲維持原有可靠度則設計參數之標準差愈大而彈簧平均螺旋直徑也愈大，以較小的拉伸荷重即可達到相同拉伸量。在相同可靠度下，標準差與彈簧線徑尺寸之變化幾乎呈線性關係，標準差與平均螺旋直徑尺寸之變化關係亦然，三種破壞準則在相同可靠度下之不同標準差與彈簧線徑尺寸、不同標準差與平均螺旋直徑尺寸之變化關係趨於一致，圖內三條直線近似平行只是有誤差。應用此可靠度設計分析能滿足使用中不發生失效之設計構想。

6.5.2 IC 卡讀取頭端子之可靠度設計

現在假設可靠度為 0.9999，意即每一萬個僅一個發生失效，查常態分佈數值表可知可靠度指標 $\beta=3.72$ ，而且變數標準差給予調整，在懸臂長 l 的設計值為 7.74mm 時計算板厚，在板厚 h 的設計值為 0.3mm 時計算懸臂長，其數據可由(6-4)、(6-6)、(6-8)等相關式子計算解得，整理數據如表 42 與表 43、圖 59 與圖 60，可知在懸臂長設計值不變時，欲維持原有可靠度則設計參數之標準差愈大而板厚愈小，以減少端子固定端之彎曲應力。若在板厚設計值不變時，欲維持原有可靠度則設計參數之標準差愈大而懸臂長也愈大，以減少端子固定端之彎曲應力。在相同可靠度下，標準差與板厚尺寸之變化幾乎呈線性關係，標準差與懸臂長尺寸之變化關係亦然，三種破壞準則在相同可靠度下之不同標準差與板厚尺寸、不同標準差與懸臂長尺寸之變化關係趨於一致，圖內三條直線近似平行只是有誤差。

6.6 敏感度分析

敏感度分析主要是討論變數之間的相互變化關係，由性能函數對設計參數做偏微分，代表導數在最可能失效點的梯度值(即斜率)，若為正相關變化則其斜率為正值，反之，斜率為負值。斜率值愈大表示敏感度值愈大，亦表示設計因子變動對於可靠度的影響力大小。敏感度分析的目的是要了

解參與分析的數據如發生變動時對結論的影響，如果參與分析的數據在一定限度內的改變並不影響分析的結論，就可認為目前的分析是可信的。

6.6.1 拉伸彈簧之敏感度分析

將表 34 之相關數據代入(6-59)至(6-76)式計算整理如表 44，為三種破壞準則可靠度指標 β 值之敏感度分析數據，觀察可知均一致對於彈簧線徑 d 與平均螺旋直徑 D 之變化較敏感，此與前節之分析結果一致，而且彈簧線徑 d 與平均螺旋直徑 D 對 β 值之影響兩者呈相反趨勢。此外，三個破壞準則之 β 值敏感度變化一致且相近。藉此敏感度分析可知性能函數 τ_a 、 F_S 、 H 的哪些隨機變數對於可靠度有重大影響，以便做更進一步分析，以訂定最佳的設計參數值。

6.6.2 IC 卡讀取頭端子之敏感度分析

將表 35 之相關數據代入(6-106)至(6-120)式計算整理如表 45，為三種破壞準則可靠度指標 β 值之敏感度分析數據，觀察可知均一致對於板厚 h 、懸臂長 l 、端子變位 δ 之變化較敏感，而且板厚與懸臂長對 β 值之影響兩者呈相反趨勢。端子變位 δ 對於 β 值也有重大影響，此意謂端子變位 δ 愈大則應力振幅愈大，造成應力振幅大於疲勞應力之機率愈大而使得可靠度降低。此外，三個破壞準則之 β 值敏感度變化一致且相近。

由上述的計算與觀察可體會出，若想要充分滿足性能就無法滿足實際上的可靠度要求，或是只要性能上些微之變更，便可以大幅改善可靠度或者降低成本。但是若為了提高可靠度，而在性能上做相當程度的調整，這種情況就須慎重考慮。應確定有關設計之參數與變數，對已知狀況取較大之容許條件以降低失效發生之機率，結合材料變異與負荷條件變異(無法預期)計算出其誤差並加以補償，反覆調整以求得最適的可靠度。

七、結論與未來工作

本文目的在對於複合式讀卡機應用失效模式與效應分析(FMEA)，推斷容易引起疲勞失效的零件，然後建立三種不同破壞準則探討零件疲勞壽命的可靠度。在 FMEA 的分析結果中，IC 卡讀取頭裝置的拉伸彈簧和 IC 卡讀取頭端子的疲勞失效會嚴重影響複合式讀卡機的可靠度，此兩種零件利用三種破壞準則即「疲勞應力小於工作應力振幅」、「安全因數小於 1」、「工作應力點與 Goodman 失效面的距離小於 0」，計算可靠度指標 β 值，並且做可靠度分析、可靠度設計、敏感度分析。所得結果整理以下幾點結論：

1. 三種破壞準則之可靠度指標 β 值以疲勞應力小於工作應力振幅的破壞準則之 β 值為最大。而以安全因數破壞準則所求得之 β 值為最小也最保守，此因它在 Goodman Diagram 之工作應力點與失效面的距離最短，所以根據安全因數破壞準則做可靠度設計時，可使零件疲勞壽命達到一百萬次之失效機率較低。
2. 於敏感度分析結果中，拉伸彈簧之可靠度指標 β 值對於彈簧線徑 d 與平均螺旋直徑 D 之變化甚敏感，IC 卡讀取頭端子之可靠度指標 β 值對於板厚 h 、懸臂長 l 、變位 δ 之變化甚敏感，亦即這些參數為影響疲勞壽命之可靠度的重要設計變數。藉由敏感度分析可以了解設計參數之改變時影響整個系統可靠度之行為。
3. 在維持相同之可靠度下，當設計參數標準差增減變化時，拉伸彈簧之線徑與平均螺旋直徑之變化呈相反趨勢，IC 卡讀取頭端子之板厚與懸臂長之變化呈相反趨勢，此均因為應力與設計參數標準差的變化呈相反趨勢之故，可依上述關係做設計值調整，以達到最佳設計。
4. 在傳統疲勞設計中，安全因數常藉由 Goodman Diagram 估算，由上述方法求得之安全因數為一常數，無法明確表示安全性之機率，此常數化的作法不符實際需要，因強度與應力均為隨機變數，故安全因數亦為隨機變數呈機率分佈。因此，本文應用可靠度概念與使用三種破壞準則，在 Goodman 圖中以 first order second moment 方法計算可靠度指標 β 值，研

究結果顯示是一可行的方法，有別於耗時實驗收集數據建立 SN 曲線，然後以機率分佈理論量化可靠度。

5. 評估疲勞壽命達到一百萬次，在安全因數破壞準則中，拉伸彈簧之可靠度指標 β 值高達 11.78，IC 卡讀取頭端子之可靠度指標 β 值為 2.01，經查閱複合式讀卡機的回廠維修資料，沒有 IC 卡讀取頭裝置之拉伸彈簧與端子的疲勞失效的維修記錄，顯現在正常使用情況之下，拉伸彈簧與 IC 卡讀取頭端子的疲勞壽命可靠度甚高，研判為複合式讀卡機的使用環境極為單純，其疲勞壽命主要以在讀卡時與 IC 卡讀取頭裝置連動的拉伸彈簧與 IC 卡讀取頭端子來決定。此外，雖無 IC 卡讀取頭端子的疲勞失效的維修記錄，但其 β 值僅約 2.01，失效機率為 2.2216%，有必要考慮進行可靠度設計改善減少端子固定端的彎曲應力，以提高疲勞壽命可靠度。
6. 材料的疲勞壽命由材料承受單一負荷週期的破壞強度所決定，因此，疲勞強度和靜態的材料強度有關。如果知道材料的抗拉強度，即可得到疲勞限的近似值[28]，以估算疲勞壽命可靠度。由計算所得到的疲勞限的範圍會與實驗值有很大不同，是因為疲勞壽命數據具有離散性，數據離散性(標準差)愈小，表示產品均勻性愈佳，其影響因素包括：材料組織、形狀與尺寸、表面狀況、平均應力、熱處理、腐蝕及環境溫度等。

未來工作：

1. 探討拉伸彈簧兩端勾部之不同形狀與尺寸對於疲勞壽命的影響，因為拉伸彈簧使用時需考慮以勾部之降伏應力(疲勞限度)限定最大荷重。
2. 在相同設計變位下，IC 卡讀取頭端子於不等板寬，對 IC 卡讀取頭端子疲勞壽命之影響。
3. 作用於 IC 卡讀取頭端子的荷重與變位的關係設計成非線性特性，依變位而改變其有效作用的懸臂長，當端子需較長懸臂時可應用之。
4. 卡片材質為 PVC，經消費者使用後，其不規則變形對於 IC 卡讀取頭端子疲勞壽命的影響。
5. IC 卡讀取頭端子與 IC 卡直接接觸，從而達到傳遞訊號目的，其接觸阻抗藉由端子表面之鍍金層降低，對於鍍金含量、膜厚、表面粗糙度需進行研究，以提高訊號傳遞之可靠度。

參考文獻

- [1]曾兆弘，「讀卡機機構體與控制技術」，機械工業雜誌，156~163 頁，民國八十六年六月。
- [2]林炳奇，IC 卡結構與應用，全欣資訊圖書公司，台北，民國八十年十月。
- [3]同亨科技股份有限公司九十二年度年報，新竹，民國九十三年四月。
- [4]A. H-S. Ang and W. H. Tang, Probability Concepts in Engineering Planning and Design, John Wiley & Sons Inc. , New York , 1975
- [5]P. Kales, Reliability for Technology, Engineering and Management, Prentice- Hall, Inc., New Jersey, 1998
- [6]B. S. Dhillon, Mechanical Reliability: Theory, Models and Applications, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., U.S., 1988
- [7]C. E. Ebeling, An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, pp374-378, McGraw-Hill Companies Inc., 1997
- [8]柯輝耀，可靠度保證—工程與管理技術之應用，二版，中華民國品質學會，台北，民國八十六年六月。
- [9]周錫英，張起明，「實施失效模式、效應與關鍵分析(FMECA)之功能、需求與步驟」，品質管制月刊，第 30 卷第 12 期，民國八十三年。
- [10]J. A. Collins, Failure of Materials in Mechanical Design, John Wiley & Sons Inc. , New York , 1981
- [11]D. B. Kececioglu, “Probabilistic Design Method for Reliability and Data Requirement”, Failure Prevention and Reliability, S. B. Bennett, ed., ASME, pp. 285-309, New York, 1977
- [12]V. A. Avakov, “Safety Factor in Fatigue under Fluctuating Stresses”, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in design, Vol. 109, pp. 397-401, October 1987
- [13]C. Mischke, “A Method of Relating Factor of Safety and Reliability”, ASME Journal of Engineering for Industry, pp. 537-542, August 1970
- [14]D. T. May and M. Massoud, “On the Relation Between the Factor of Safety and Reliability”, ASME Journal of Engineering for Industry, pp. 852-857, August 1974
- [15]C. Bagci, “Fatigue Design of Machine Elements Under Cumulative Damage Effect, Using Bagci’s Fatigue Failure Surface Line”, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in design, Vol. 106, pp. 466-475, October 1984
- [16]C. H. Chang, “A General Method for Estimating Reliability of Machine Elements Subjected to Fluctuating Load”, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and

Reliability in design, Vol. 105, pp. 150-159, April 1983

- [17]周有洸，金大仁，「彈簧式安全閥之失效分析與可靠度評估」，國立交通大學，碩士論文，民國九十二年。
- [18]D. Sebastian, Encyclopedia of Spring Design , Technology Committee of Spring Manufacturers Institute, Illinois, U.S., 2001
- [19]森昌幹，百百義當，武田定彥，機械設計製圖，賴耿良譯，復文書局，台南，民國七十一年八月。
- [20]朱敏德，機械元件設計，新文京開發出版股份有限公司，台北，民國九十二年四月。
- [21]闕金木，馬達與控制元件，機械月刊社，台北，民國七十八年十月。
- [22]B. Pugh 著，磨損與磨耗，楊春欽譯，科技圖書股份有限公司，台北，民國七十三年五月。
- [23]王宗華，可靠度工程技術手冊，中華民國品質管制學會，台北，民國八十五年八月。
- [24]日本彈簧技術協會編，彈簧之設計及製造，賴耿陽譯，復漢出版社，台南，民國七十四年五月。
- [25]林佑信，李超飛，「智慧卡於循環負載下之黏彈力學分析」，國立成功大學，碩士論文，民國九十年。
- [26]戴久永，可靠度導論，三民書局，台北，民國七十九年二月。
- [27]石逸群，王國雄，「累積失效與可靠度關係之探討」，國立中央大學，碩士論文，民國八十九年。
- [28]S. Kalpakjian and S. R. Schmid, Manufacturing Engineering and Technology, Prentice-Hall, Inc. New Jersey , U.S.,2001

表 34 拉伸彈簧相關參數之平均值與標準差

參數 X	平均值 \bar{X}	標準差 σ_X
線材抗拉強度 S_{ult} (kg/mm ²)	187.04	6.788
線材降伏強度 S_{yp} (kg/mm ²)	141.93	5.430
疲勞剪應力 τ_e (kg/mm ²)	46.76	1.697
彈簧常數 K (g/mm)	10.932	0.2148
剪彈性係數 G (kg/mm ²)	5981.834	117.5112
線徑 d (mm)	0.23	0.00333
平均螺旋直徑 D (mm)	2.532	0.0123
有效圈數 n (圈)	12.25	0.02777
拉伸量 δ (mm)	5	0



表 35 IC 卡讀取頭端子相關參數之平均值與標準差

參數 X	平均值 \bar{X}	標準差 σ_X
材料抗拉強度 S_{ult} (kg/mm ²)	56.86	0.4065
材料降伏強度 S_{yp} (kg/mm ²)	51.40	0.3705
疲勞應力 S_e (kg/mm ²)	21.32	0.1524
彈簧常數 K (g/mm)	76.02	2.0859
楊式係數 E (kg/mm ²)	8703.822	238.81
板寬 b (mm)	0.6	0.006667
板厚 h (mm)	0.3	0.006667
懸臂長 l (mm)	7.74	0.03333
變位量 δ (mm)	0.4395	0

表 36 拉伸彈簧的三種破壞準則之 β 值與性能函數對設計參數之敏感度

破壞準則 $\tau_e < \tau_a$	β	$\frac{\partial \tau_{a'}}{\partial d}$	$\frac{\partial \tau_{a'}}{\partial D}$	$\frac{\partial \tau_{a'}}{\partial G}$	$\frac{\partial \tau_{a'}}{\partial n}$	$\frac{\partial \tau_{a'}}{\partial S_{ult}}$
	16.03	100.6523	-17.2897	0.003448	-1.6839	-0.01387
破壞準則 $F_S < 1$	β	$\frac{\partial F_S}{\partial d}$	$\frac{\partial F_S}{\partial D}$	$\frac{\partial F_S}{\partial G}$	$\frac{\partial F_S}{\partial n}$	$\frac{\partial F_S}{\partial S_{ult}}$
	11.78	-10.5411	1.8107	-0.000361	0.1763	0.01155
破壞準則 $H < 0$	β	$\frac{\partial H}{\partial d}$	$\frac{\partial H}{\partial D}$	$\frac{\partial H}{\partial G}$	$\frac{\partial H}{\partial n}$	$\frac{\partial H}{\partial S_{ult}}$
	13.96	-98.9529	16.9978	-0.003390	1.6554	0.2342

表 37 拉伸彈簧的三種破壞準則取不同標準差之 β 值

標準差 σ_X 設計 (d, D, G, n, Sult)	$P_S (\tau_e > \tau_a)$	$P_S (F_S > 1)$	$P_S (H > 0)$
	β		
標準差*0.25	66.41	47.12	55.84
標準差*0.75	21.37	15.71	18.61
標準差*1	16.03	11.78	13.96
標準差*1.25	12.82	9.42	11.17
標準差*1.75	9.16	6.73	7.98

表 38 IC 卡讀取頭端子的三種破壞準則之 β 值與性能函數對設計參數之敏感度

破壞準則 $S_e < S_a$	β	$\frac{\partial S_{a'}}{\partial E}$	$\frac{\partial S_{a'}}{\partial h}$	$\frac{\partial S_{a'}}{\partial l}$	$\frac{\partial S_{a'}}{\partial S_{ult}}$
	2.25	0.002949	85.5857	-6.6345	-0.1139
破壞準則 $F_S < 1$	β	$\frac{\partial F_S}{\partial E}$	$\frac{\partial F_S}{\partial h}$	$\frac{\partial F_S}{\partial l}$	$\frac{\partial F_S}{\partial S_{ult}}$
	2.01	-0.0001241	-3.6016	0.2792	0.019002
破壞準則 $H < 0$	β	$\frac{\partial H}{\partial E}$	$\frac{\partial H}{\partial h}$	$\frac{\partial H}{\partial l}$	$\frac{\partial H}{\partial S_{ult}}$
	2.17	-0.002123	-61.5871	4.7742	0.3512

表 39 IC 卡讀取頭端子的三種破壞準則取不同標準差之 β 值

標準差 σ_X 設計 (h, l, E, Sult)	Ps ($S_e > S_a$)	Ps ($F_S > 1$)	Ps ($H > 0$)
	β		
標準差*0.25	7.63	8.04	8.70
標準差*0.75	2.97	2.68	2.90
標準差*1	2.25	2.01	2.17
標準差*1.25	1.81	1.61	1.74
標準差*1.75	1.30	1.15	1.24

表 40 可靠度 0.9999 並取不同標準差之彈簧線徑 d

標準差 σ_X 設計 (d, D, G, n, Sult)	Ps ($\tau_e > \tau_a$) = 0.9999	Ps ($F_S > 1$) = 0.9999	Ps ($H > 0$) = 0.9999
	線徑 d (mm)		
標準差*0.25	0.4212	0.4204	0.4191
標準差*0.75	0.3978	0.3898	0.3909
標準差*1	0.3862	0.3745	0.3770
標準差*1.25	0.3747	0.3589	0.3631
標準差*1.75	0.3518	0.3267	0.3355

表 41 可靠度 0.9999 並取不同標準差之彈簧平均螺旋直徑 D

標準差 σ_X 設計 (d, D, G, n, Sult)	Ps ($\tau_e > \tau_a$) = 0.9999	Ps ($F_S > 1$) = 0.9999	Ps ($H > 0$) = 0.9999
	平均螺旋直徑 D (mm)		
標準差*0.25	1.8002	1.8023	1.8049
標準差*0.75	1.8632	1.8854	1.8805
標準差*1	1.8956	1.9305	1.9202
標準差*1.25	1.9289	1.9789	1.9615
標準差*1.75	1.9988	2.0875	2.0498

表 42 可靠度 0.9999 並取不同標準差之 IC 卡讀取頭端子板厚 h

標準差 σ_x 設計 (h, l, E, Sult)	Ps ($S_e > S_a$) = 0.9999	Ps ($F_S > 1$) = 0.9999	Ps ($H > 0$) = 0.9999
	板厚 h (mm)		
標準差*0.25	0.305859	0.306916	0.305840
標準差*0.75	0.287149	0.283220	0.286106
標準差*1	0.278511	0.271188	0.276788
標準差*1.25	0.270293	0.258654	0.267799
標準差*1.75	0.254939	0.231196	0.250717

表 43 可靠度 0.9999 並取不同標準差之 IC 卡讀取頭端子懸臂長 l

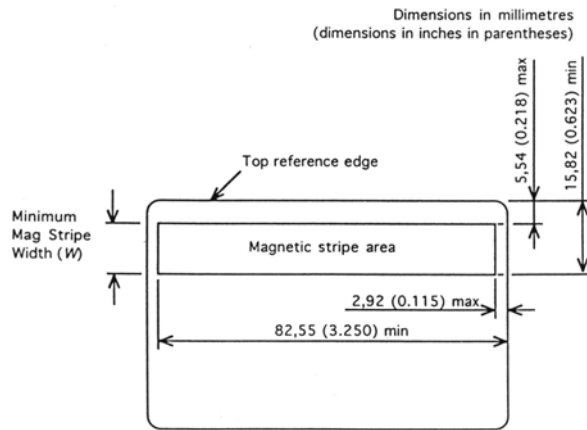
標準差 σ_x 設計 (h, l, E, Sult)	Ps ($S_e > S_a$) = 0.9999	Ps ($F_S > 1$) = 0.9999	Ps ($H > 0$) = 0.9999
	懸臂長 l (mm)		
標準差*0.25	7.66643	7.65367	7.66669
標準差*0.75	7.90518	7.95520	7.91869
標準差*1	8.0193	8.11327	8.04198
標準差*1.25	8.13032	8.28003	8.16363
標準差*1.75	8.34444	8.64464	8.40238

表 44 拉伸彈簧的三種破壞準則之 β 值的敏感度分析

破壞準則	$\frac{\partial\beta}{\partial d}$	$\frac{\partial\beta}{\partial D}$	$\frac{\partial\beta}{\partial G}$	$\frac{\partial\beta}{\partial n}$	$\frac{\partial\beta}{\partial S_{ult}}$	$\frac{\partial\beta}{\partial \delta}$
$\tau_e < \tau_a$	-59.5418	10.6906	-0.002152	1.1185	0.1502	-2.7382
$F_S < 1$	-43.8875	8.9046	-0.001332	0.8313	0.09420	-2.03092
$H < 0$	-64.2071	11.8613	-0.002138	1.1087	0.1390	-2.7143

表 45 IC 卡讀取頭端子的三種破壞準則之 β 值的敏感度分析

破壞準則	$\frac{\partial\beta}{\partial E}$	$\frac{\partial\beta}{\partial h}$	$\frac{\partial\beta}{\partial l}$	$\frac{\partial\beta}{\partial S_{ult}}$	$\frac{\partial\beta}{\partial \delta}$
$S_e < S_a$	-0.003395	-99.8792	8.1840	0.5427	-70.1469
$F_S < 1$	-0.002744	-80.8767	6.4706	0.4408	-56.9177
$H < 0$	-0.003195	-94.0546	7.5072	0.5116	-66.0465



Location of magnetic material for tracks 1, 2 and 3 on ID-1 type card

圖 1 磁條卡之磁條位置

資料來源：ISO 7811

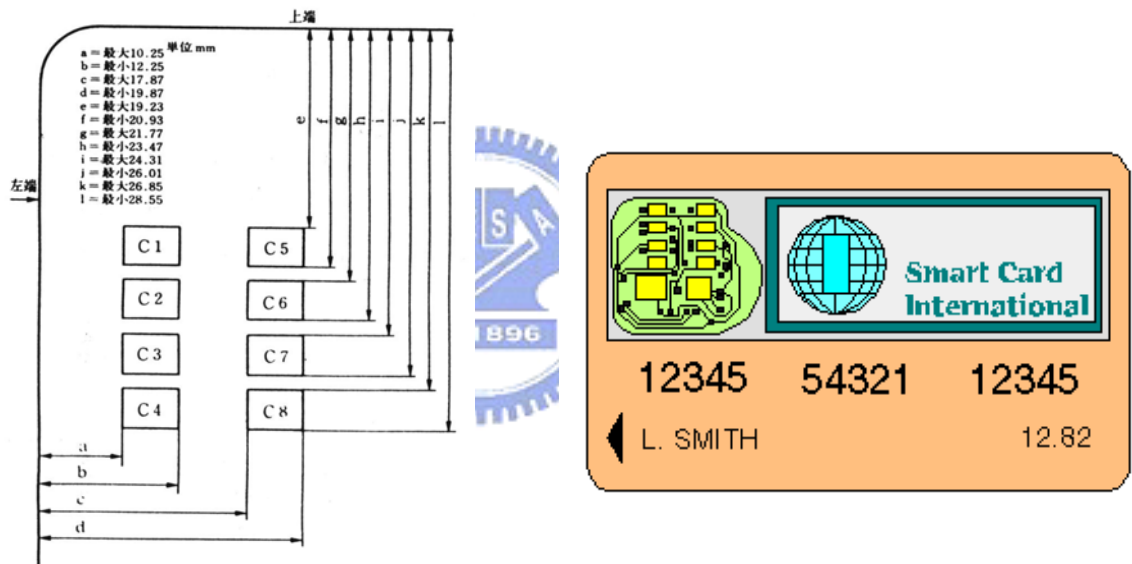


圖 2 IC 卡的端子位置

資料來源：[2]

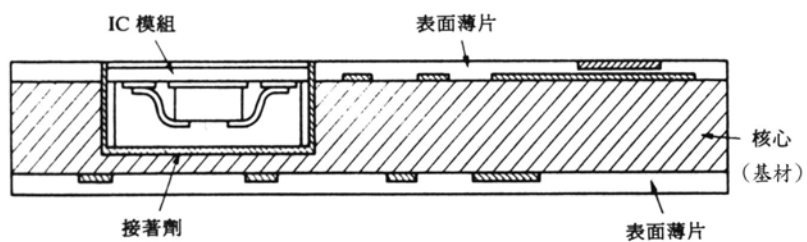


圖 3 IC 卡的基本結構

資料來源：[2]

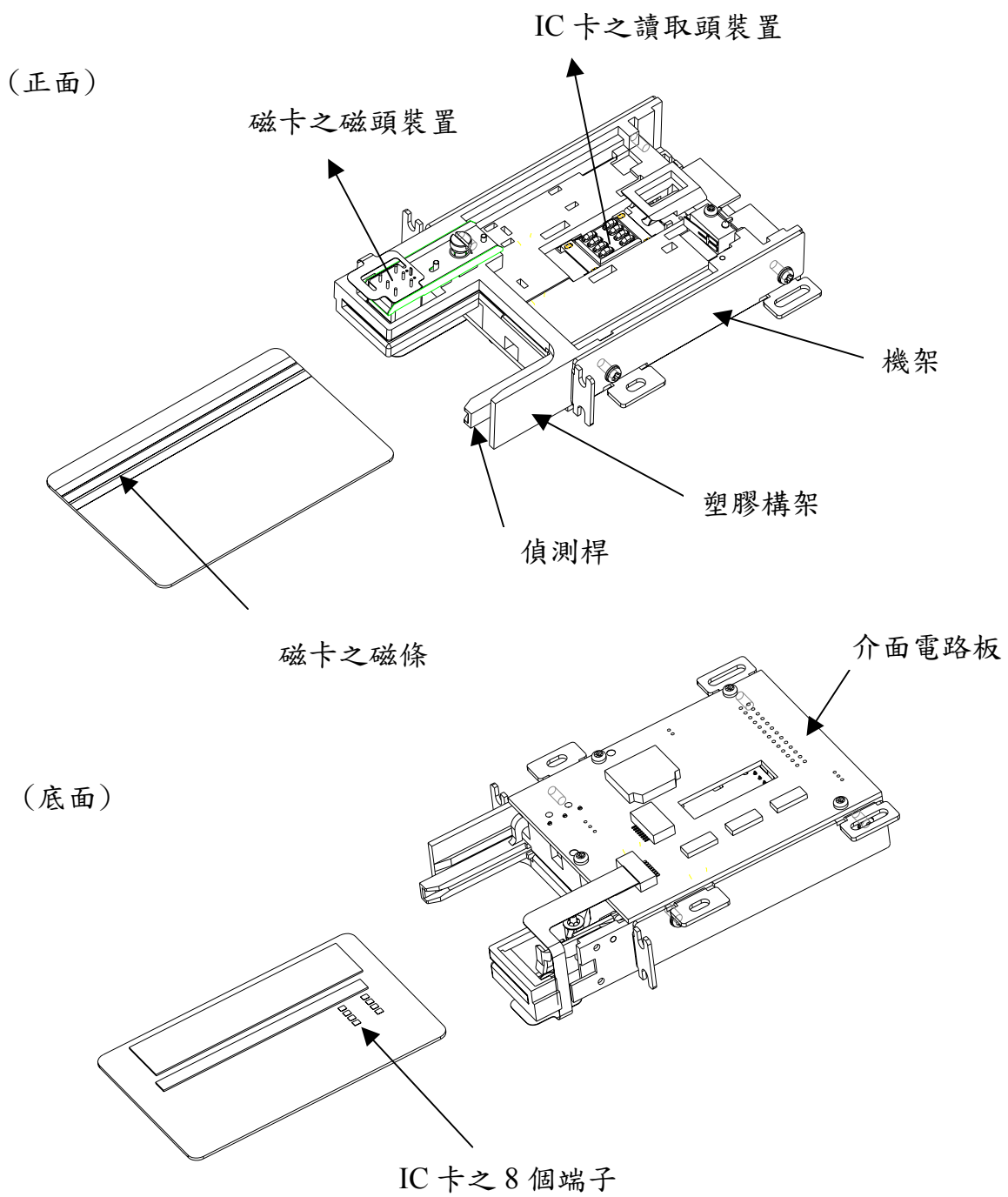


圖 4 卡片與複合式讀卡機

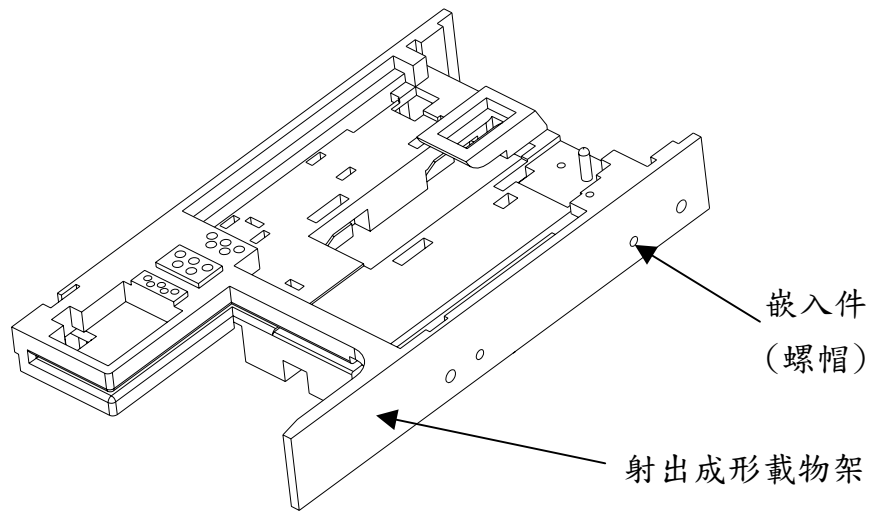


圖 5 塑膠構架

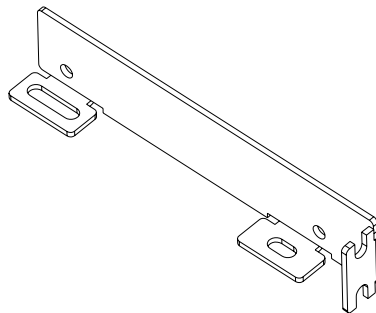


圖 6 左機架

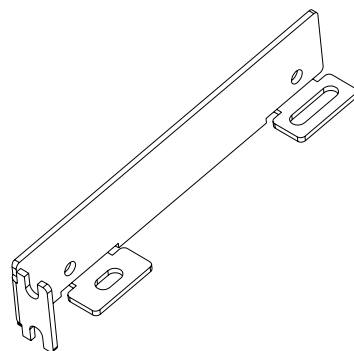


圖 7 右機架

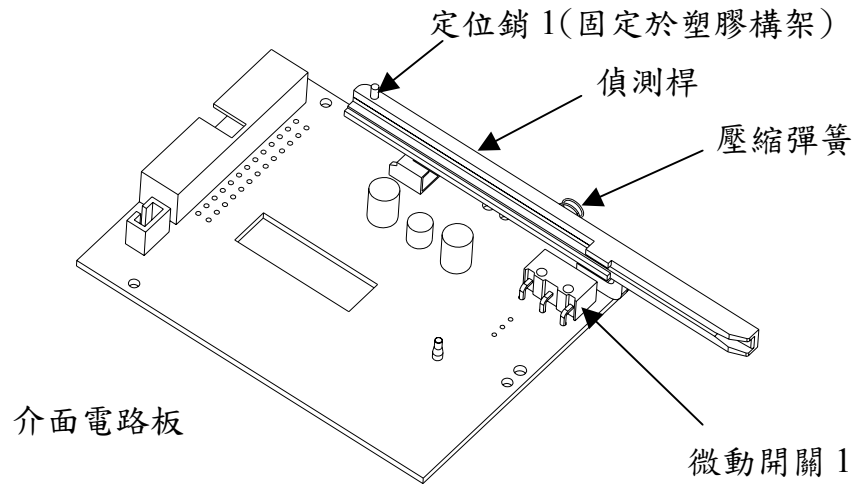


圖 8 卡片偵測裝置

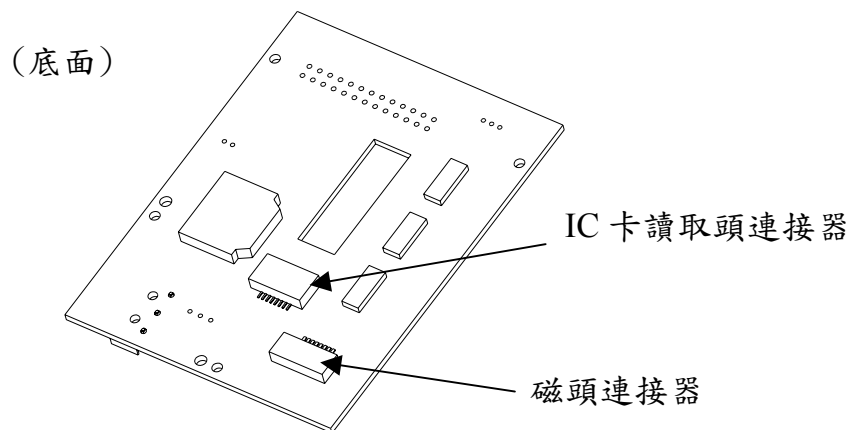
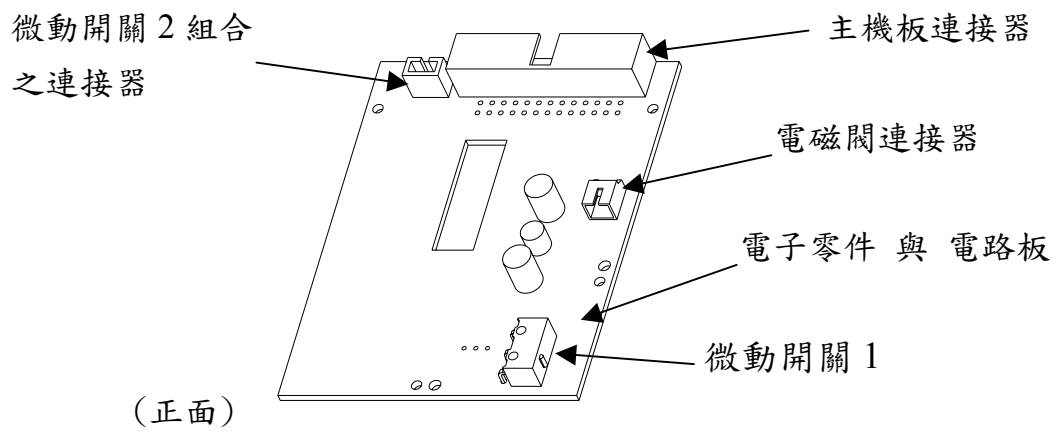


圖 9 介面電路板

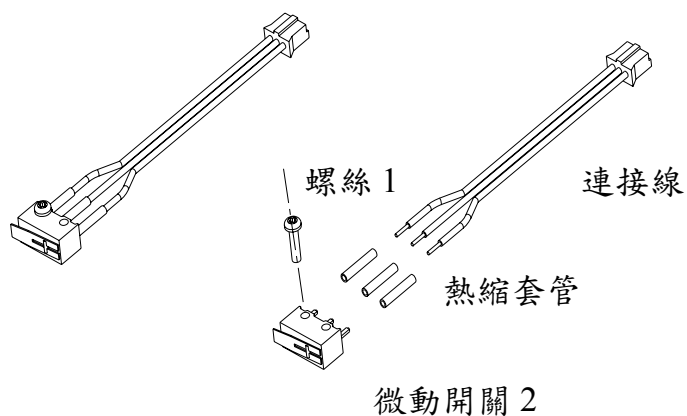


圖 10 微動開關 2 組合



(組合圖)

(分解圖)

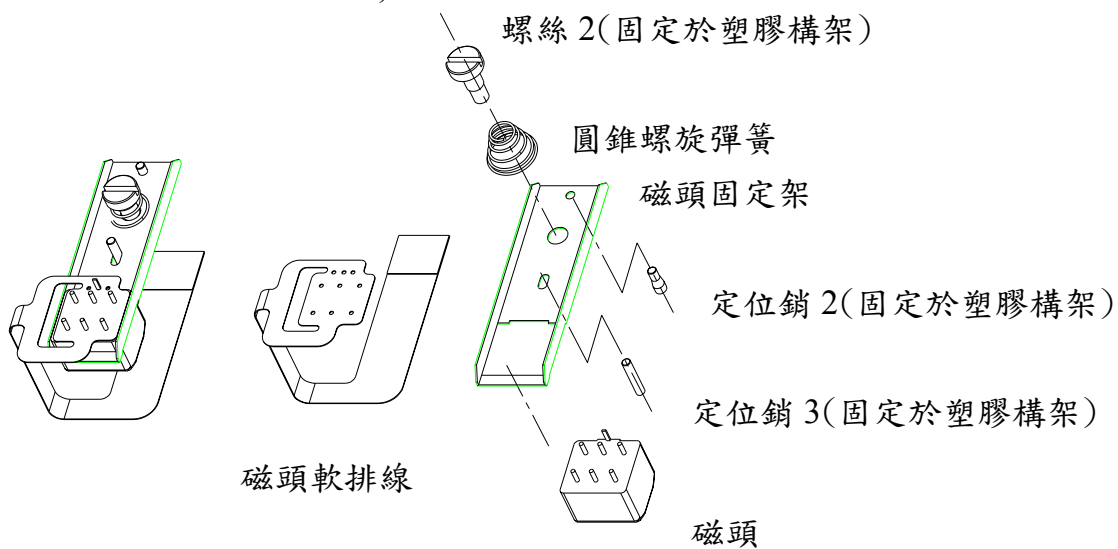
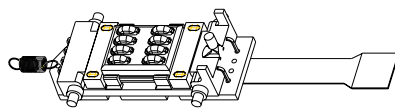


圖 11 磁卡之磁頭裝置

(組合圖)



(分解圖)

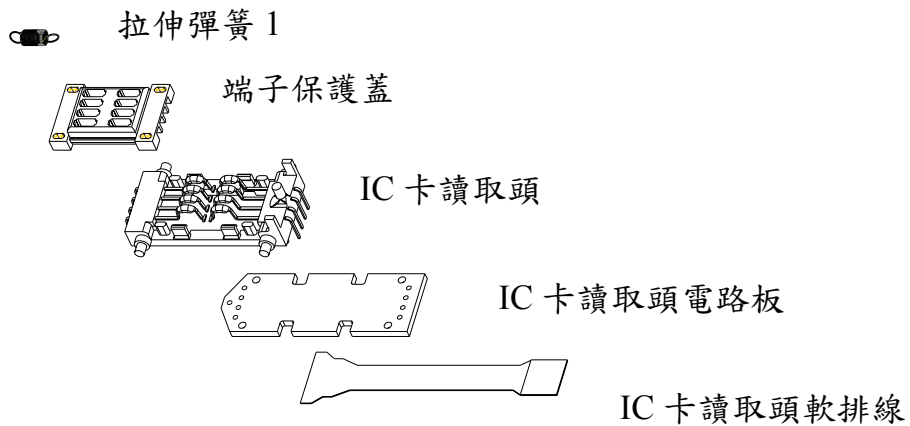


圖 12 IC 卡之讀取頭裝置

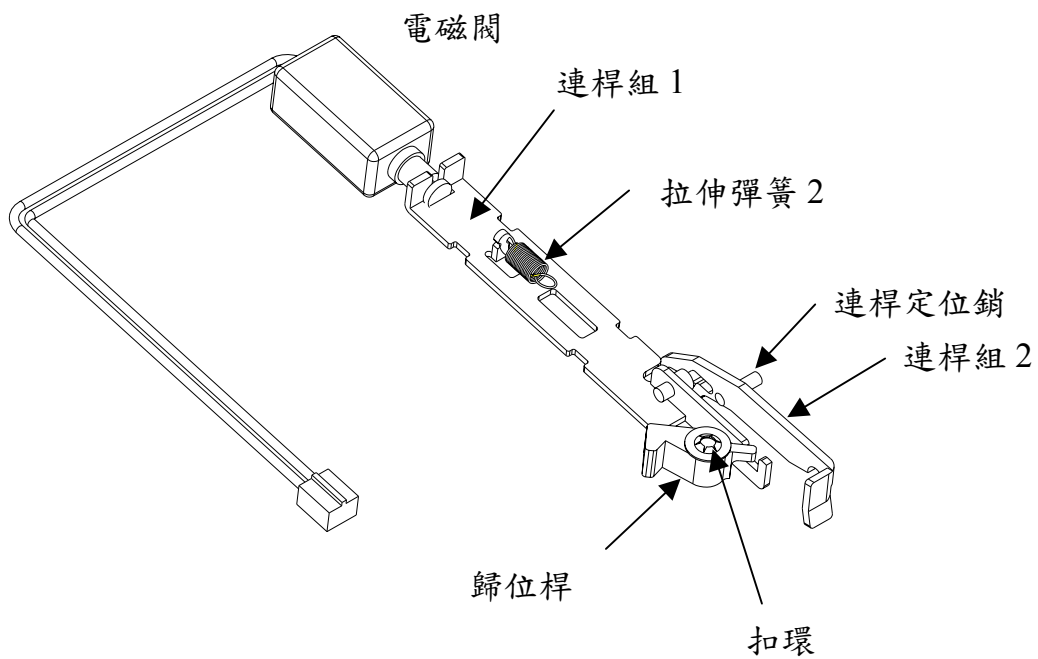


圖 13 電磁閥裝置

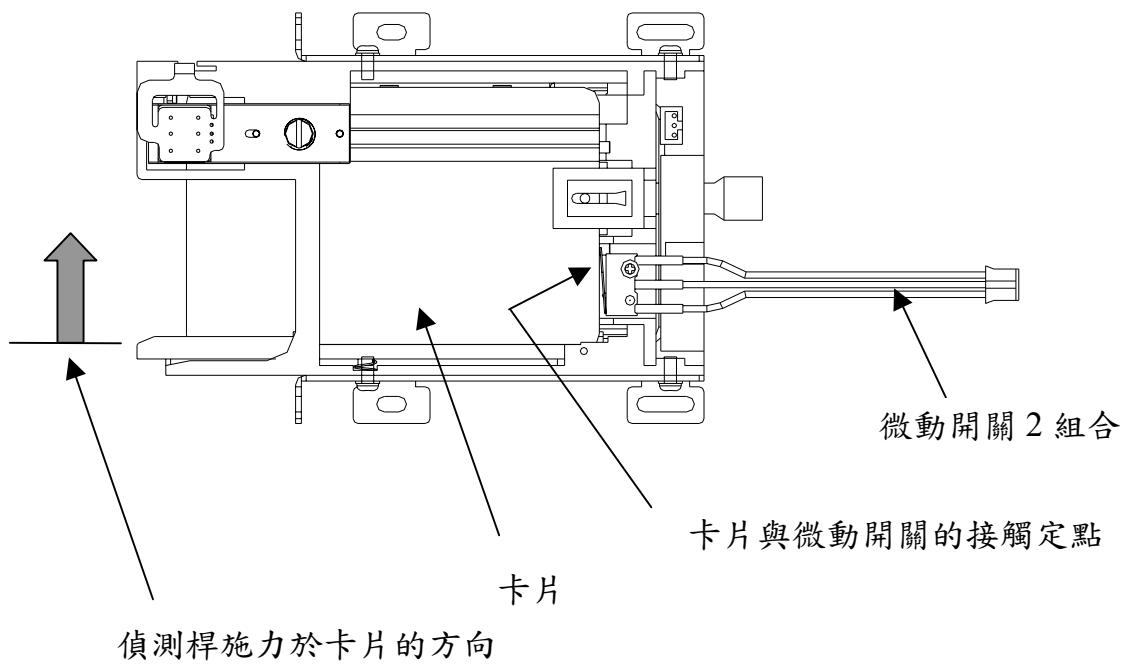


圖 14 偵測桿施力於卡片的方向、卡片與微動開關 2 的接觸定點

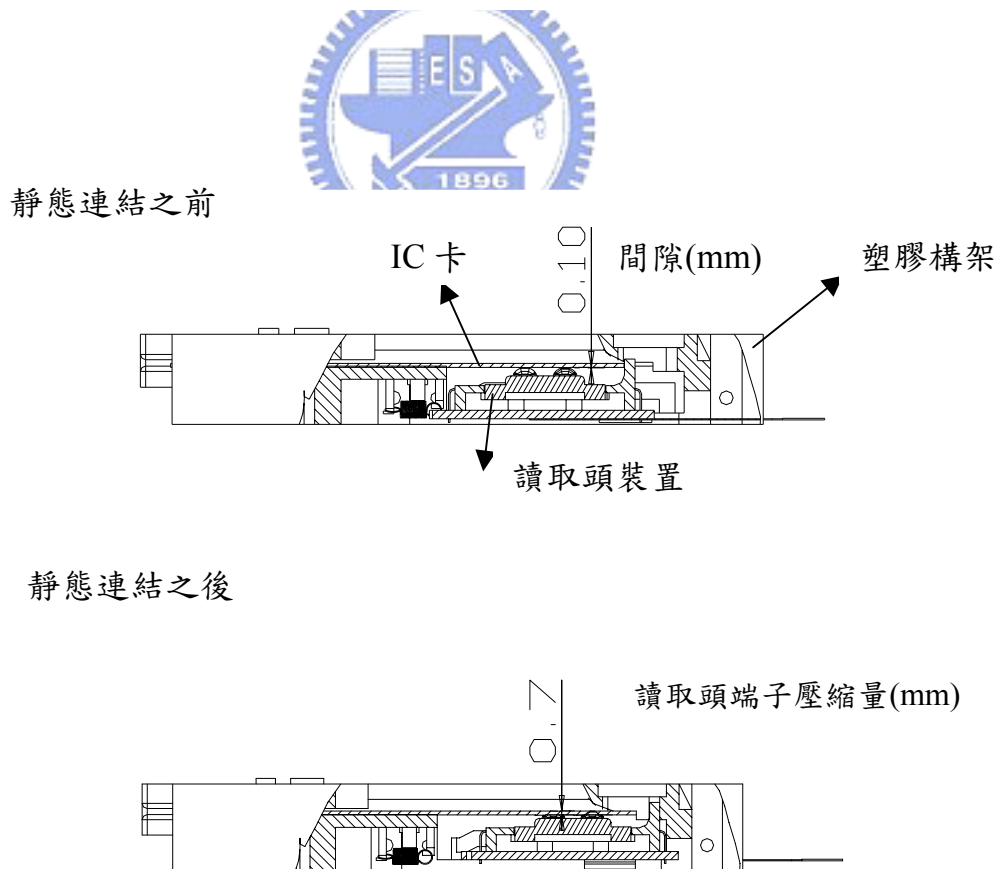


圖 15-1 IC 卡與讀取頭裝置之靜態連結

靜態連結之前

靜態連結之後

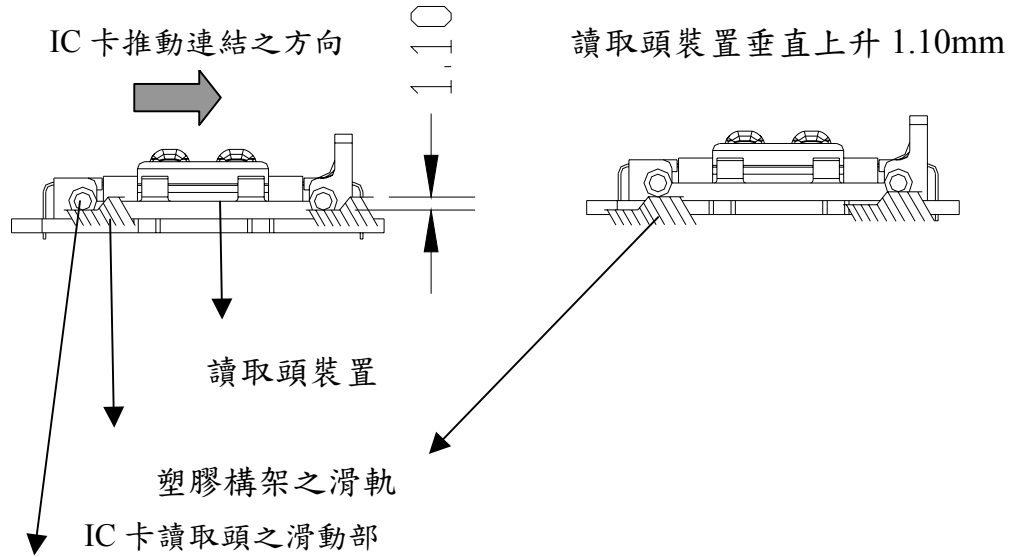


圖 15-2 IC卡與讀取頭裝置之靜態連結

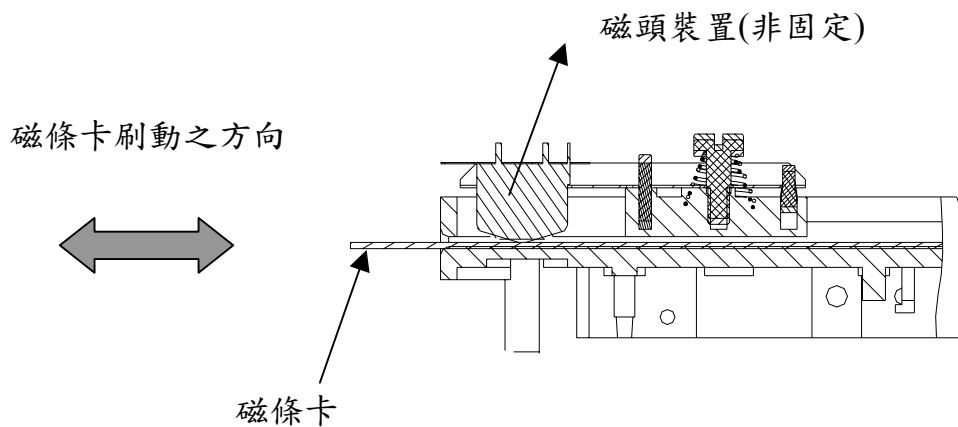


圖 16 磁條卡與磁頭裝置

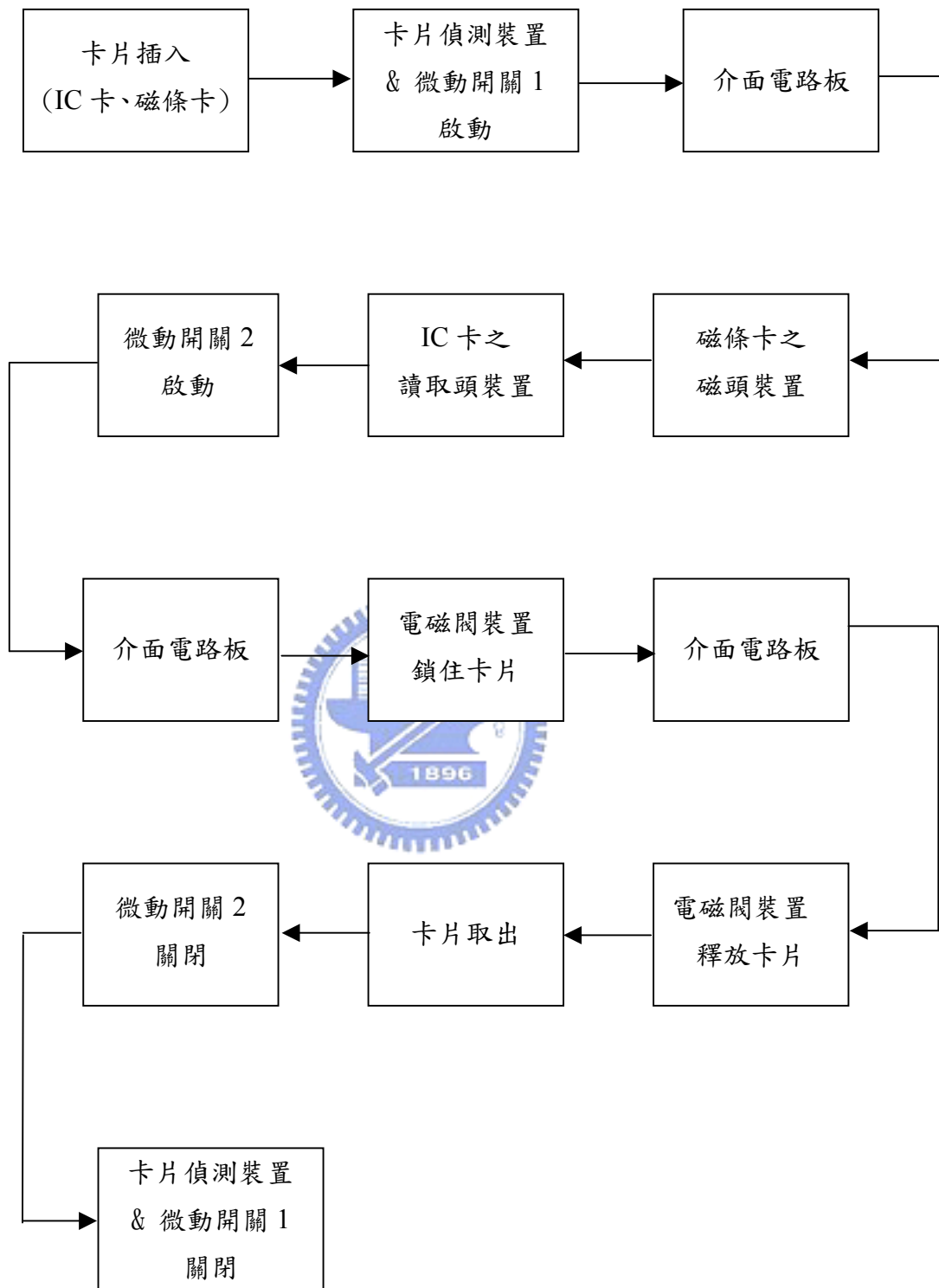


圖 17 複合式讀卡機之作動流程

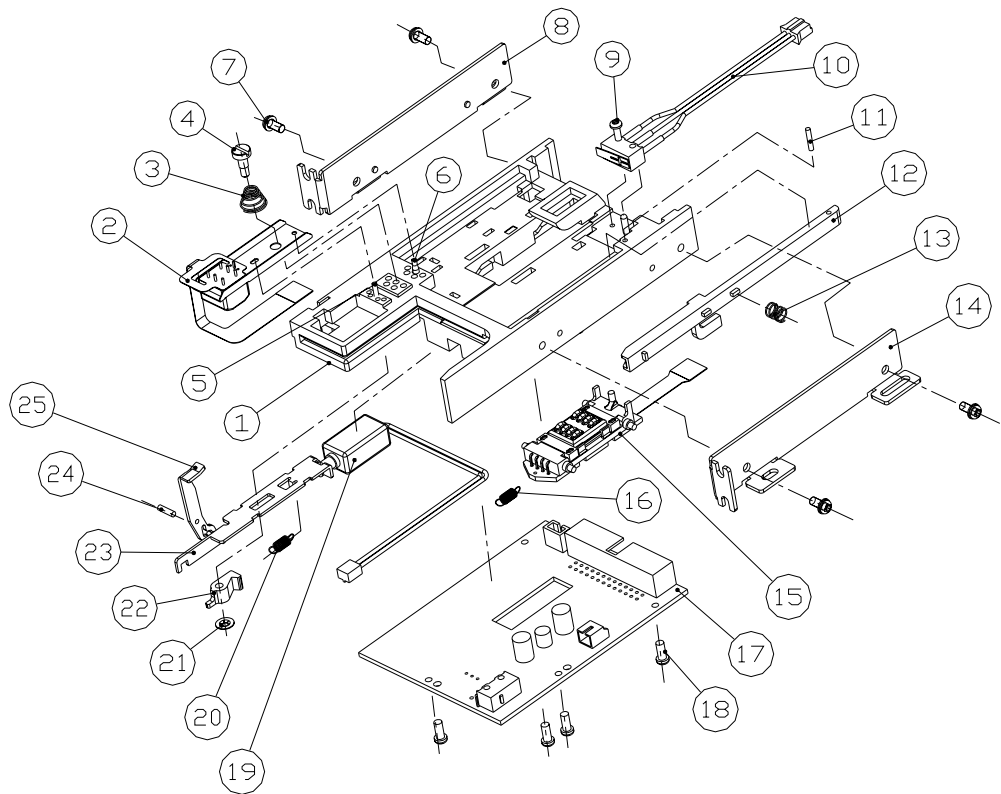
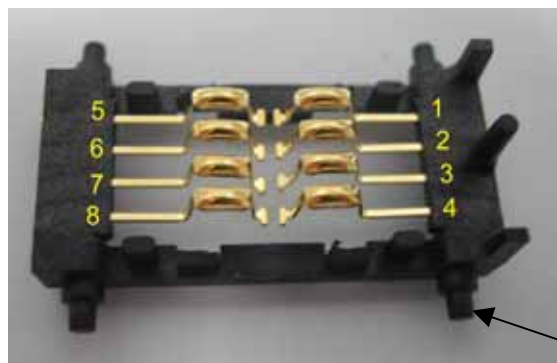


圖 18 複合式讀卡機之組件爆炸圖



8 個端子編號

IC 卡讀取頭之滑動部

圖 19 IC 卡讀取頭的端子

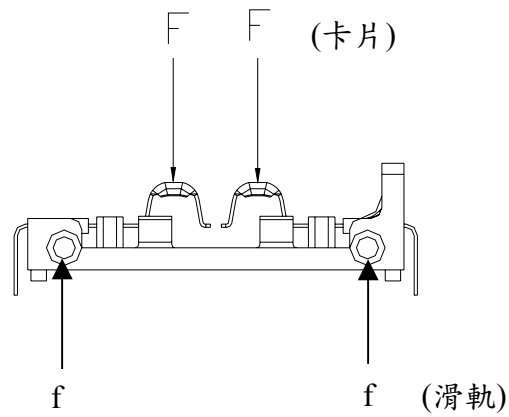
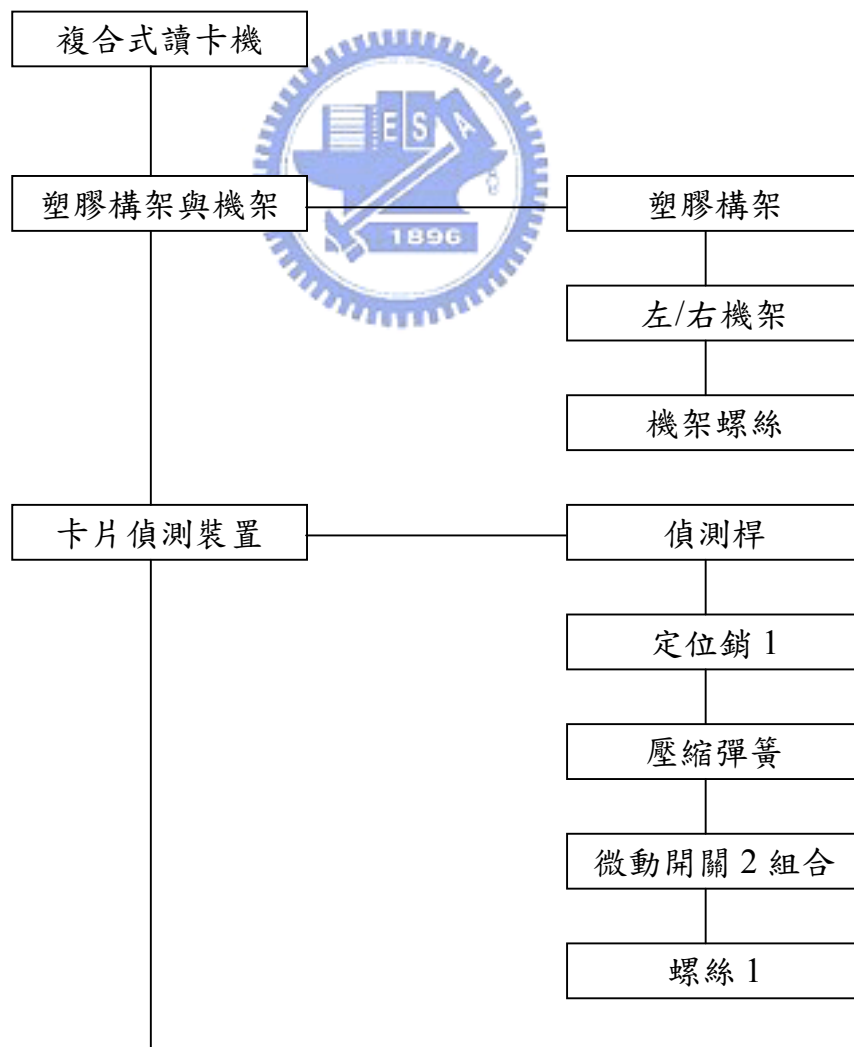


圖 20 IC 卡讀取頭端子的讀卡之受力狀況



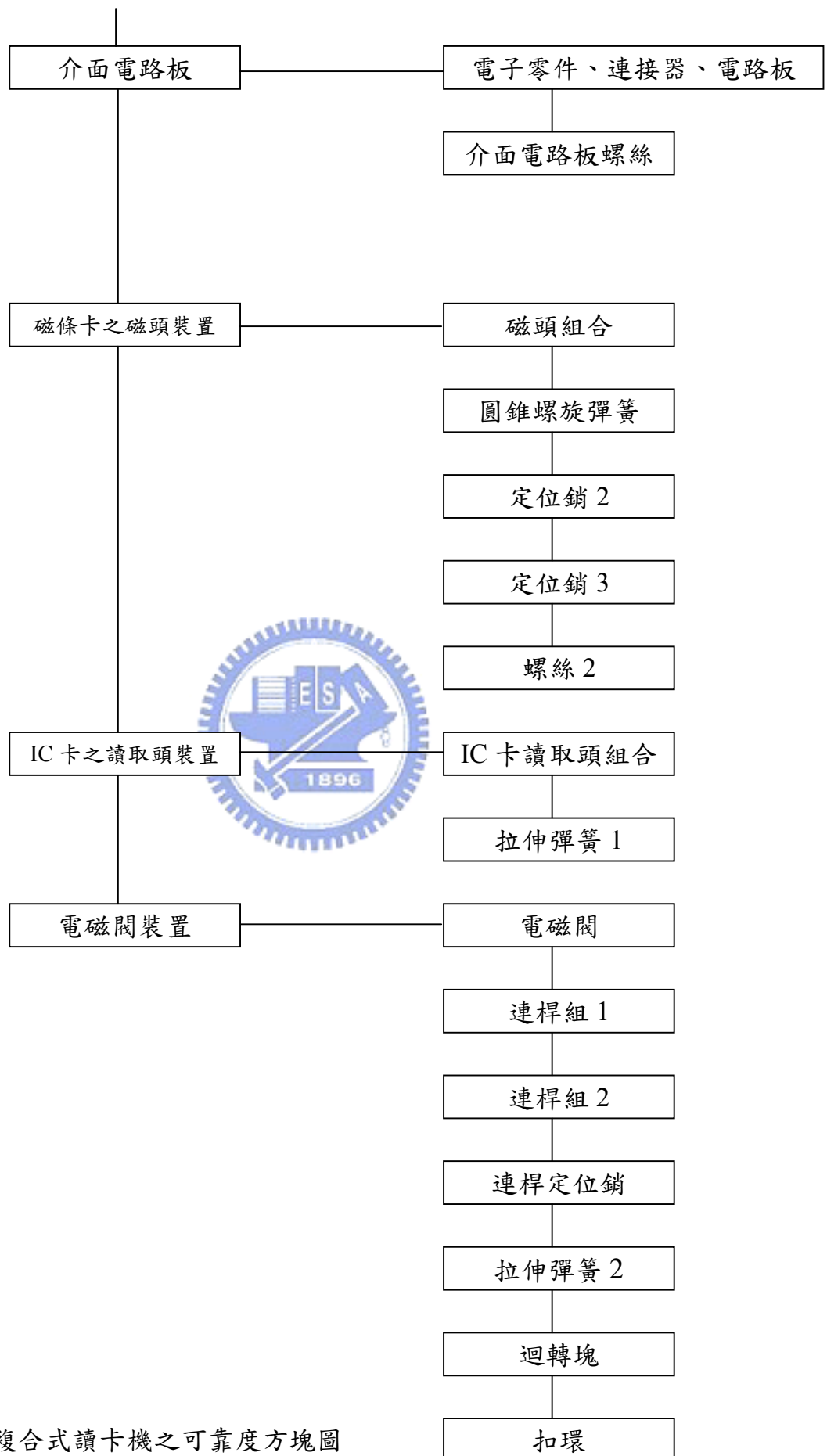


圖 21 複合式讀卡機之可靠度方塊圖

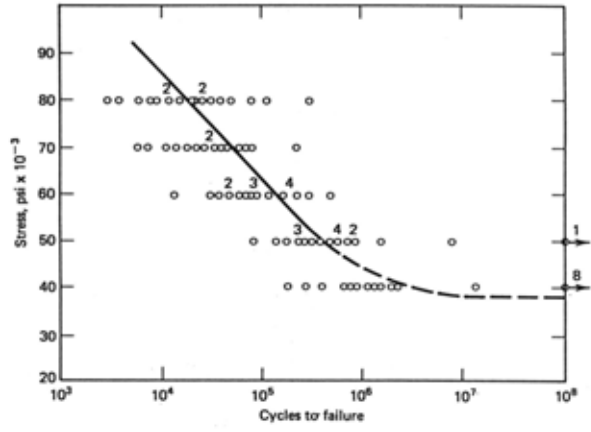


圖 22 S-N 曲線
資料來源：[10]

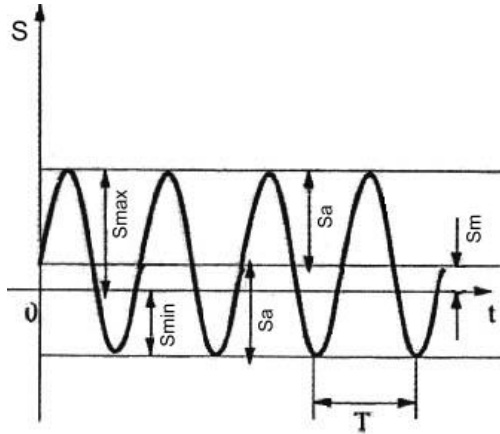


圖 23 交變應力之特性
資料來源：[10]

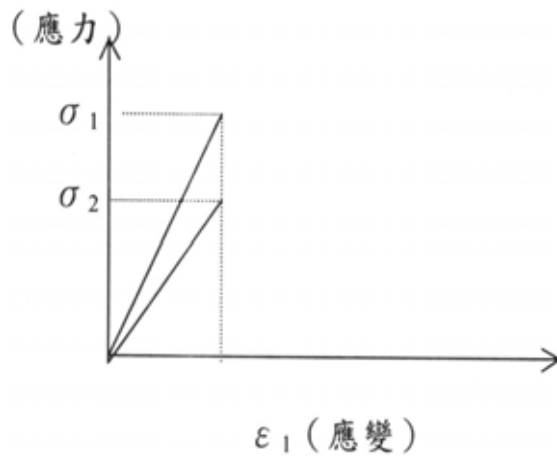
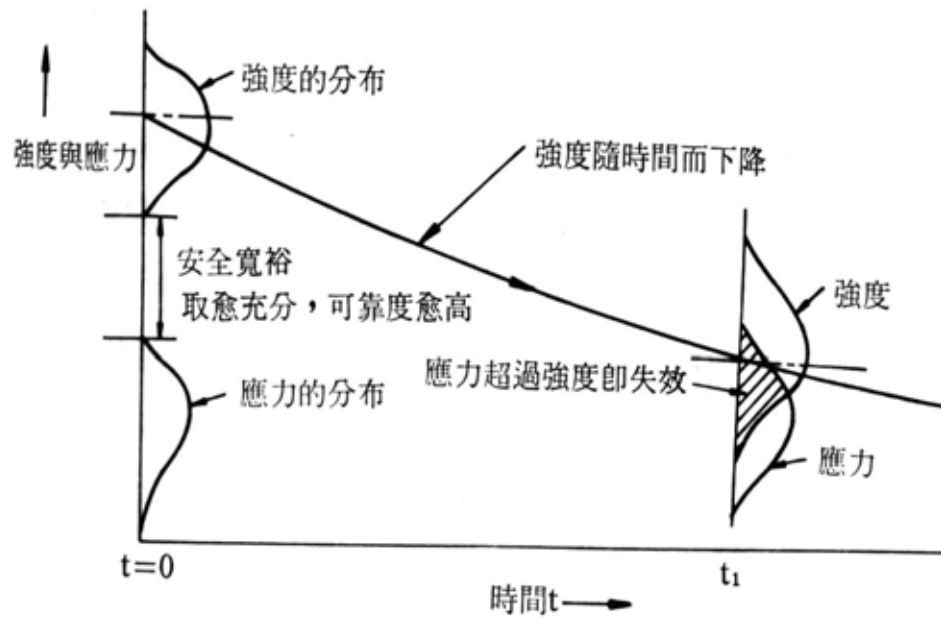


圖 24 應力鬆弛現象
資料來源：[17]



應力超過產品強度時，產品即失效

圖 25 應力與強度分佈之分析

資料來源：[26]

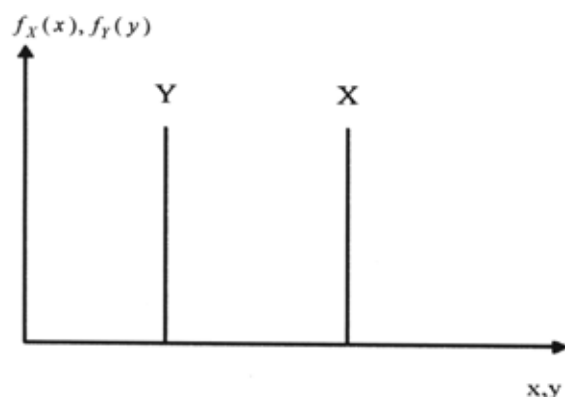


圖 26 強度 X 與應力 Y 之分佈-1

資料來源：[27]

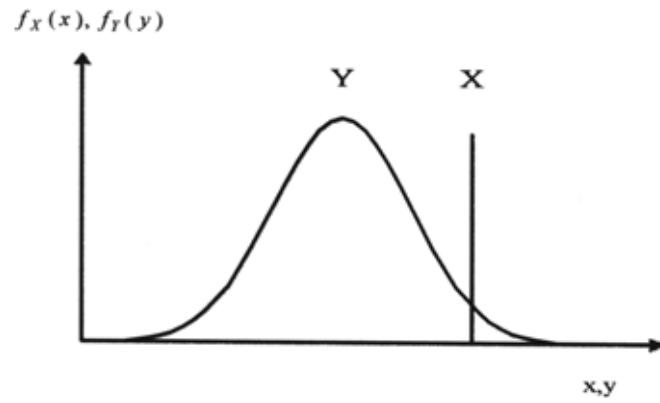


圖 27 強度 X 與應力 Y 之分佈-2
資料來源：[27]

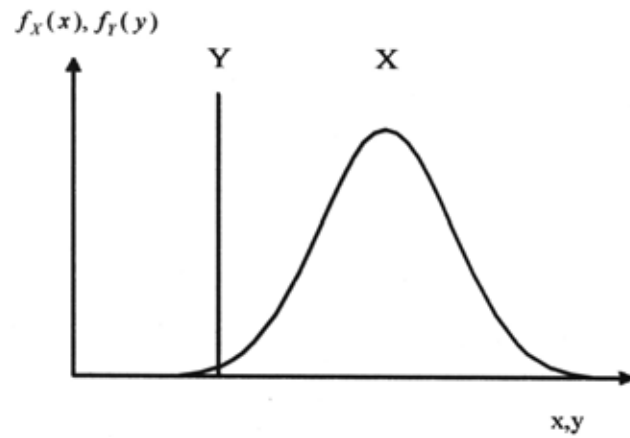


圖 28 強度 X 與應力 Y 之分佈-3
資料來源：[27]

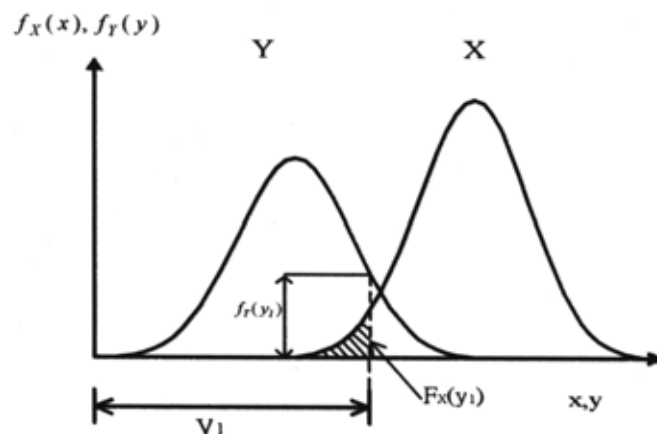


圖 29 強度 X 與應力 Y 之分佈-4
資料來源：[27]

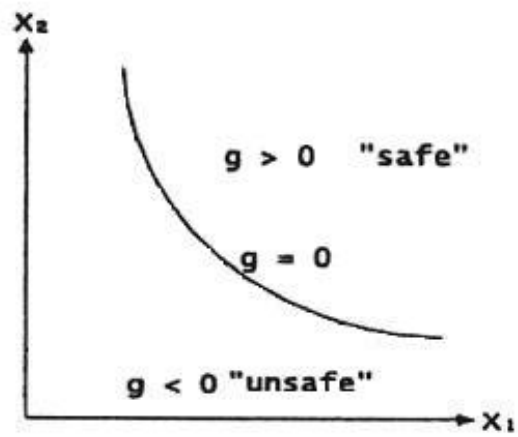


圖 30 極限狀態方程式 $g(X) = 0$
資料來源：[17]

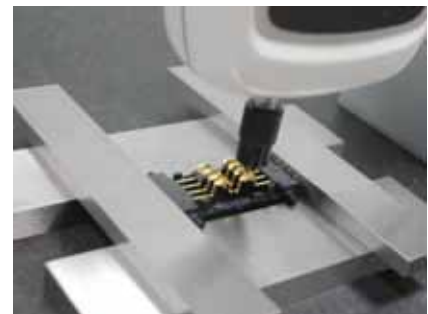
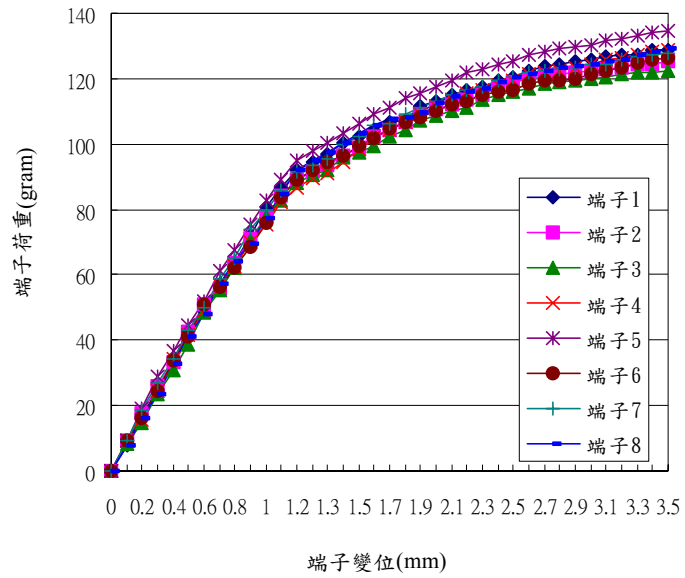


圖 31 IC 卡讀取頭端子之彈簧常數 K 值量測



平均值 \bar{K} : 76.02 g/mm , 標準差 σ_K : 2.0859 g/mm

圖 32 IC 卡讀取頭端子之實驗的彈簧常數 K 值

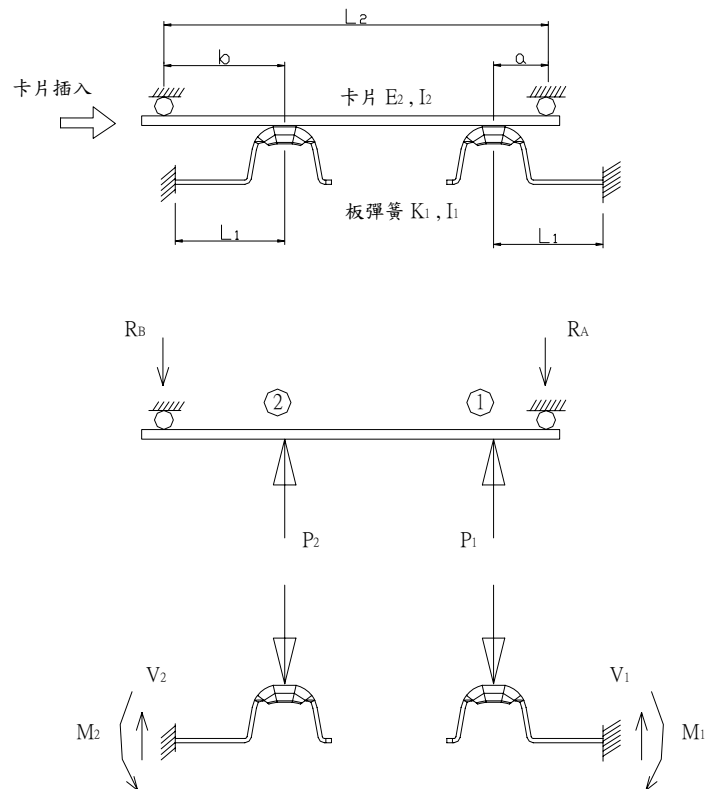
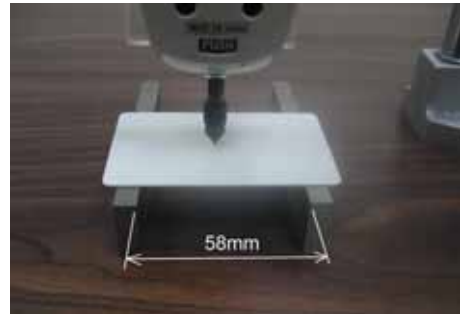
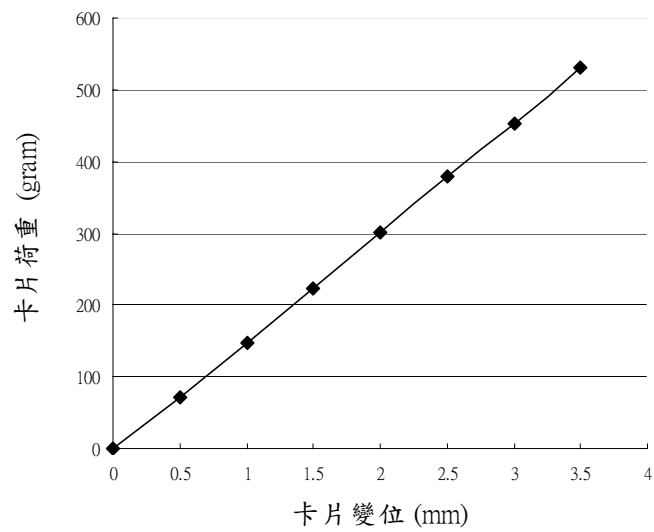


圖 33 IC 卡與讀取頭端子連結之後的相關位置和作用力



卡片跨距 58mm

圖 34 IC 卡之彈簧常數 K 值量測



平均值 \bar{K} : 152.36 g/mm , 標準差 σ_K : 1.8877 g/mm

圖 35 IC 卡之實驗的彈簧常數 K 值

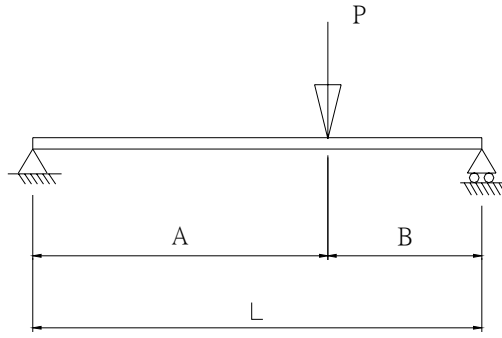
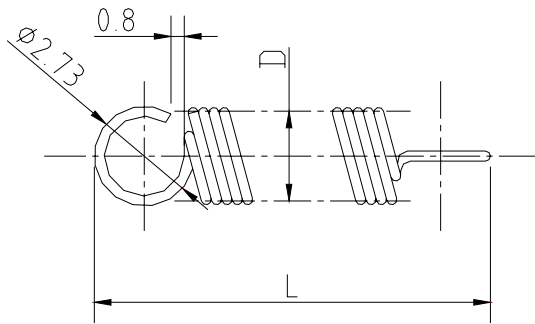


圖 36 簡支樑承受集中負荷的變位



材料：SUS 304
 線徑 d ： $\phi 0.23$ mm
 平均螺旋直徑 D ： $\phi 2.5$ mm
 螺旋有效圈數 n ：12.25
 自由長 L ：8.46 mm

圖 37 拉伸彈簧之規格

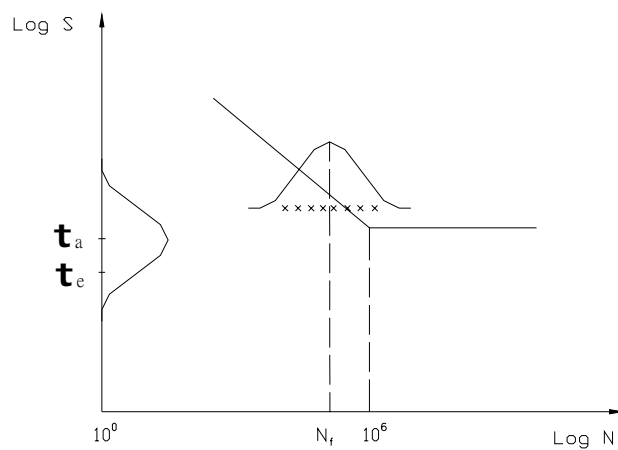
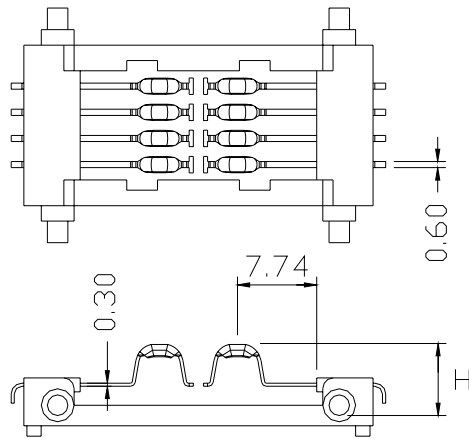


圖 38 疲勞剪應力與工作剪應力振幅之示意圖



材料：磷青銅
 板厚：0.30 mm
 板寬：0.60 mm
 懸臂長 l ：7.74 mm
 端子自由高 H ：7.0 mm

圖 39 IC 卡讀取頭端子之規格

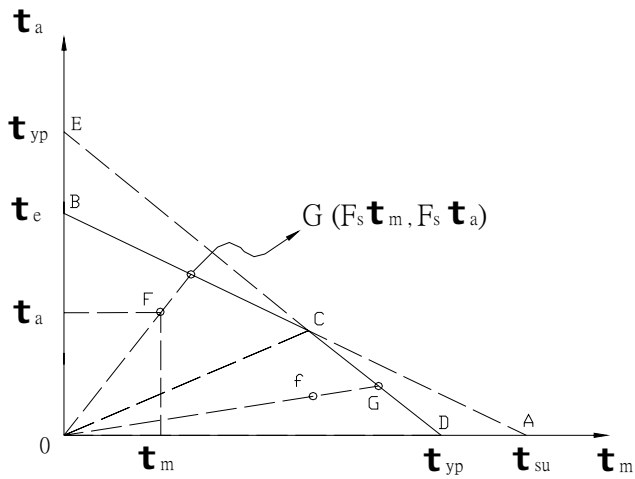


圖 40 拉伸彈簧的工作應力點接近斷裂線或塑性變形線之安全因數

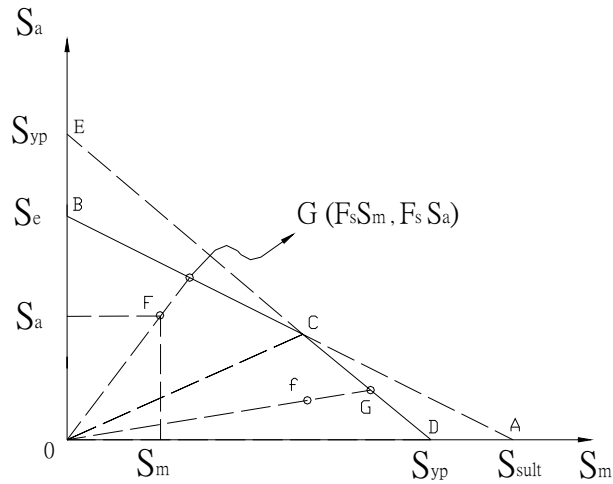


圖 41 IC 卡讀取頭端子工作應力點接近斷裂線或塑性變形線之安全因數

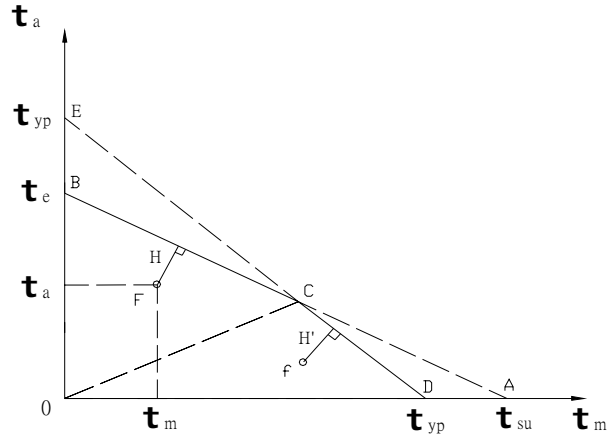


圖 42 拉伸彈簧的工作應力點與 Goodman 失效面之距離

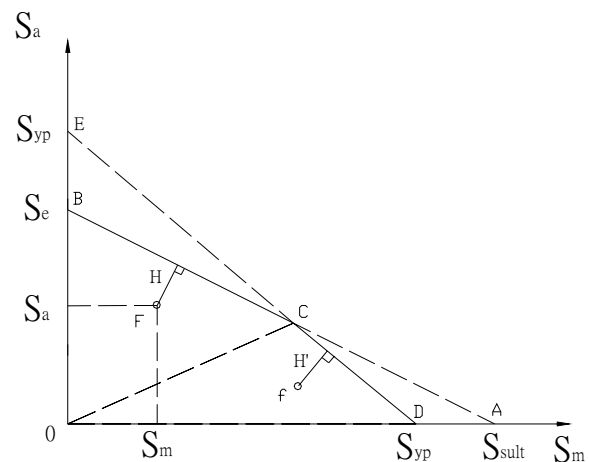


圖 43 IC 卡讀取頭端子的的工作應力點與 Goodman 失效面之距離

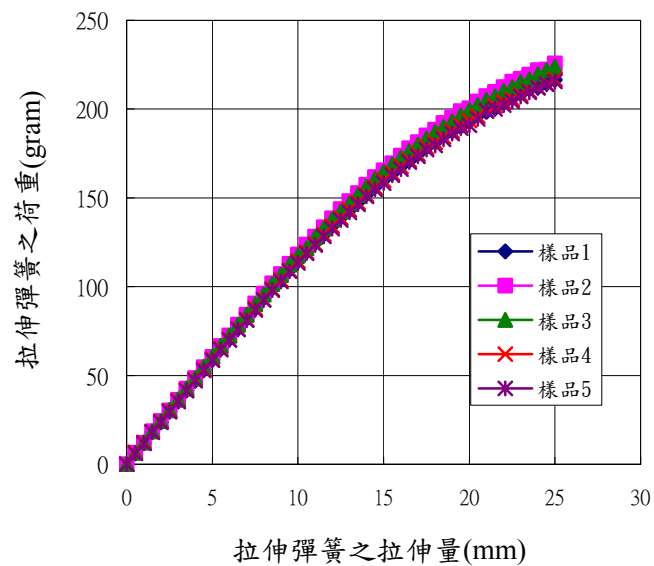


測試前



測試中

圖 44 拉伸彈簧之彈簧常數 K 值量測



平均值 \bar{K} : 10.932 g/mm , 標準差 σ_K : 0.2148 g/mm

圖 45 拉伸彈簧之實驗的彈簧常數 K 值

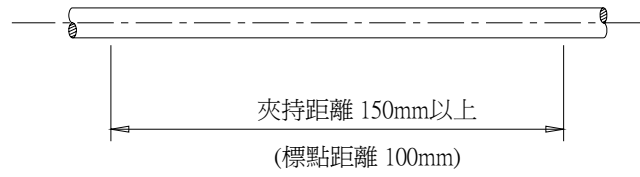


圖 46 拉伸彈簧的拉伸試片尺寸



圖 47 拉伸彈簧的拉伸試片與夾具

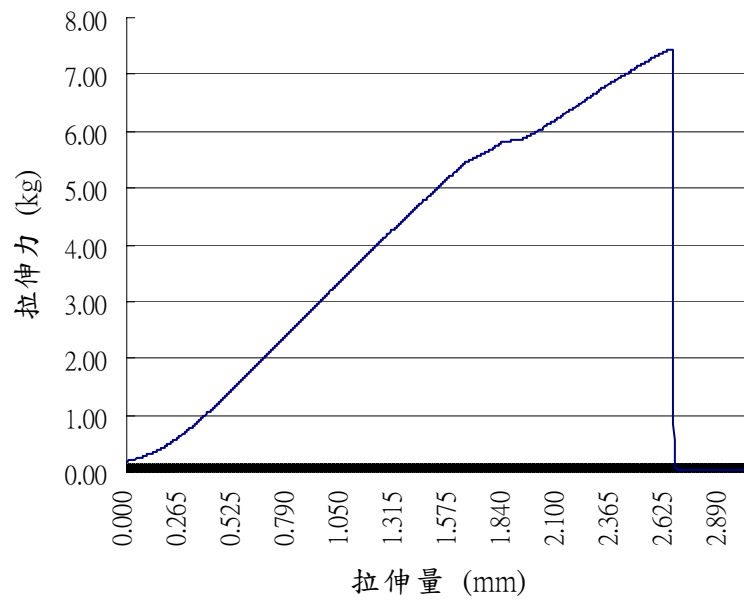


圖 48 拉伸彈簧試片的拉伸試驗曲線

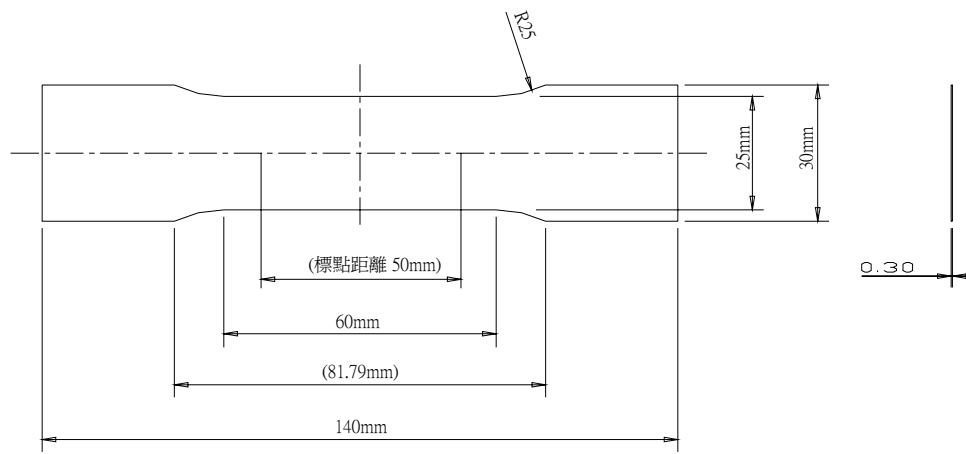


圖 49 IC 卡讀取頭端子的拉伸試片尺寸



圖 50 IC 卡讀取頭端子的拉伸試片

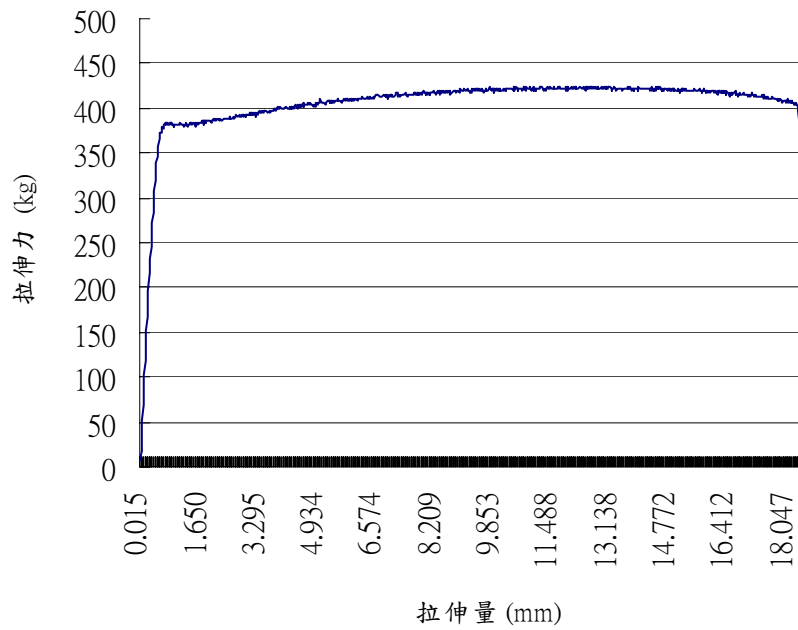


圖 51 IC 卡讀取頭端子試片的拉伸試驗曲線

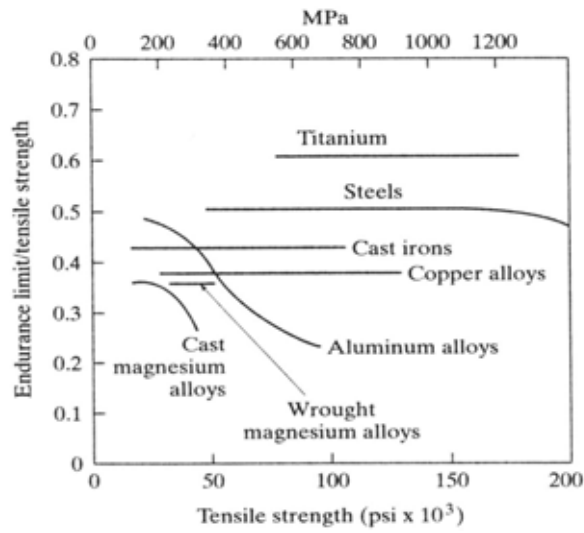


圖 52 不同材料的疲勞限應力與抗拉強度的比值

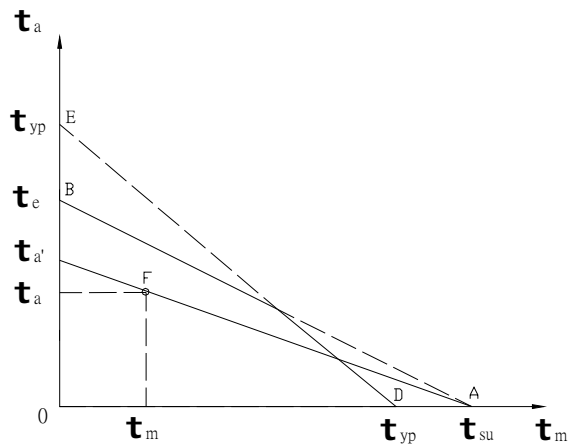


圖 53 已知拉伸彈簧工作應力點 F，求平均剪應力為 0 之等壽命剪應力振幅 τ_a

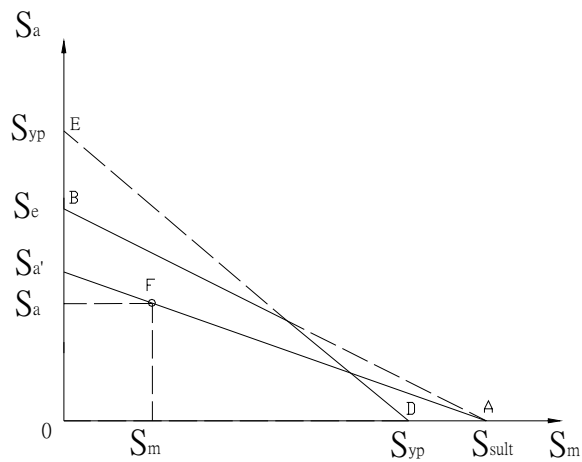


圖 54 已知 IC 卡讀取頭端子工作應力點 F，求平均彎曲應力為 0 之等壽命彎曲應力振幅 S_a

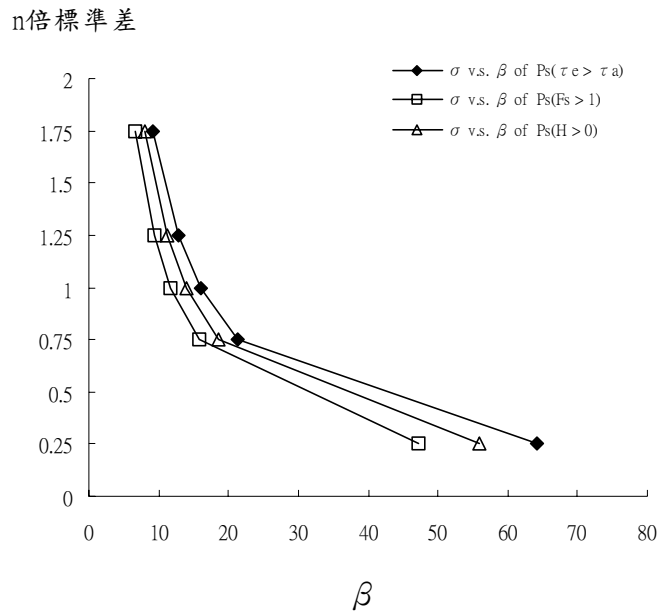


圖 55 拉伸彈簧的三種破壞準則取不同標準差之 β 值

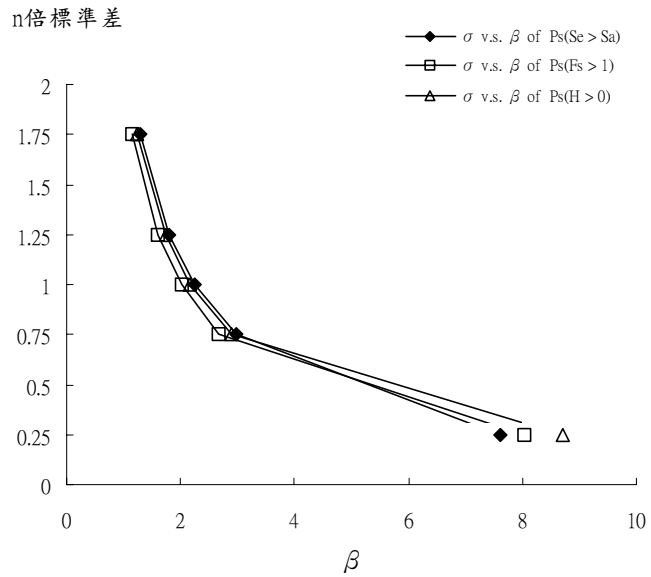


圖 56 IC 卡讀取頭端子的三種破壞準則取不同標準差之 β 值

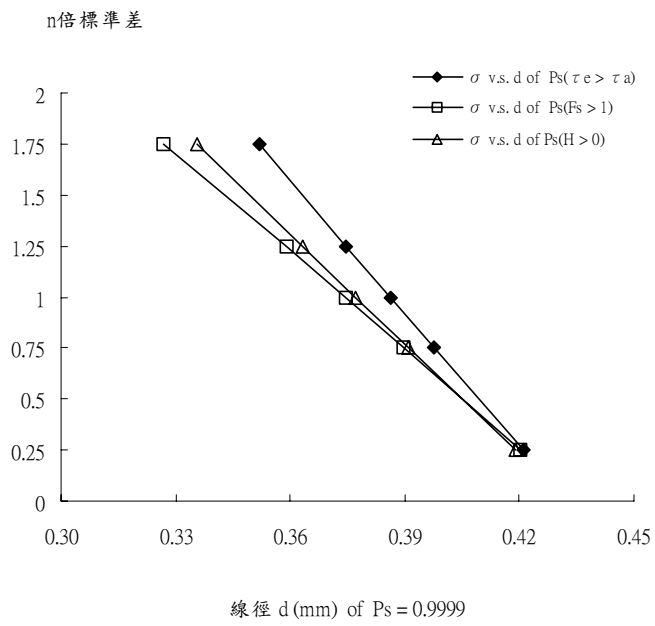


圖 57 可靠度 0.9999 之彈簧線徑 d

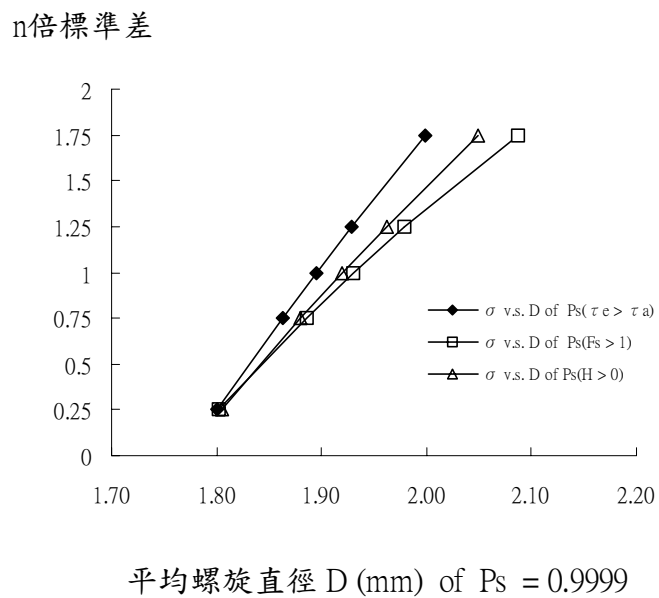


圖 58 可靠度 0.9999 之彈簧平均螺旋直徑 D

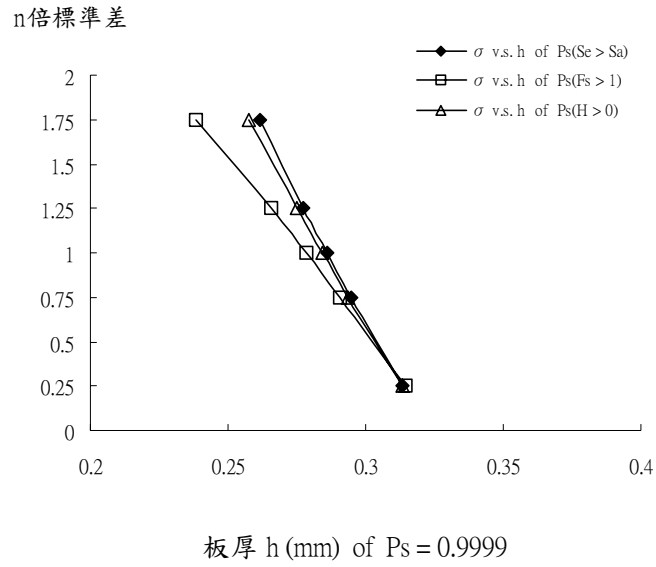


圖 59 可靠度 0.9999 之 IC 卡讀取頭端子板厚 h

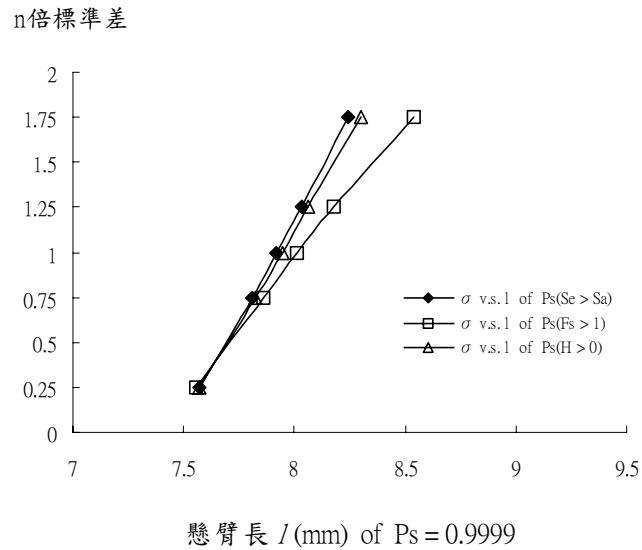


圖 60 可靠度 0.9999 之 IC 卡讀取頭端子懸臂長 l