

國立勤益科技大學

工業工程與管理系碩士班

碩士論文

IC 封裝銲線製程能力分析

指導教授：林碧川 博士

研究生：賴銘悠

學 號：B9715002

中 華 民 國 九 十 九 年 六 月

IC 封裝鐳線製程能力分析

Process Capability Analysis for Wire Bonding of IC Packaging

研究生：賴銘悠

指導教授：林碧川 博士

國立勤益科技大學

工業工程與管理系碩士班

碩士學位論文

A Thesis

Submitted to

Institute of Industrial Engineering & Management

National Chin-Yi University of Technology

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

June 2010

Taiping, Taichung, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 九 十 九 年 六 月

國立勤益科技大學

工業工程與管理系碩士在職專班

論文口試委員會審定書

本校 工業工程與管理系 碩士在職專班 賴銘悠 君

所提論文 IC 封裝鉚線製程能力分析

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

口試委員：

吳建璋

康鶴耀

林碧川

指導教授：

林碧川

系(所)主任：

賴銘悠

中華民國 99 年 6 月

IC 封裝鐳線製程能力分析

研究生：賴銘悠

指導教授：林碧川 博士

國立勤益科技大學工業工程與管理系碩士班

摘要

在半導體的製造過程中，屬於後段製程的封裝技術目的在於建構 IC 元件完整的組織架構，同時也在保護元件，避免製造過程中因外力或環境的影響，產生物理性質的破壞或化學性質的變化，影響 IC 效能；另一方面，為使 IC 晶片發揮電子訊號傳遞的功能，必須與封裝基板或導線架完成電路的連接才能將電路訊號傳輸到外界，鐳線接合 (Wire Bonding) 為目前最佳的接合方式。

製程能力指標 (Process Capability Indices, PCIs) 可用來評估產品品質是否合乎要求。一般製程能力指標大都應用在單一品質特性的產品績效評估上，而 IC 鐳線接合則屬於多品質特性製程，因此本研究利用多製程能力分析圖 (Multi- Process Capability Analysis Chart, MPCAC)，結合製程能力總指標與總良率的計算，並建立信賴下界，來進行品質分析與管制，為 IC 鐳線接合提供一套評估模式，使業者容易管控鐳線製程，提高良率與品質。

關鍵字：IC 鐳線製程、多品質特性、製程能力指標、MPCAC

Process Capability Analysis for Wire Bonding of IC Packaging

Student : Ming-Yu Lai

Advisor : Dr. Pi-Chuan Lin

Institute of Industrial Engineering and Management National Chin-Yi University of Technology

Abstract

In the semiconductor manufacture, the purpose of IC packaging, one of the back end processes, is to build the complete frameworks of IC chips while to protect the chips from physical damage and chemical change caused by the surroundings which will affect IC's efficiency. For electronic signal distribution, on the other hand, an IC chip has to be connected with substrate or lead frames to form circuits and transmit signal between the chip and the carrier. Currently, wire bonding is the best approach of electrical interconnection.

Process Capability Indices (PCIs) can be used to evaluate whether the product quality meets the requirements or not. PCIs, in general, are applied to estimate the performance of products with single characteristic. Whereas IC wire bonding process has multi-characteristic, in this paper, we use multi-process capability analysis chart (MPCAC) associating with the values of total process capability index and entire process yield, setting low confidence bounds of individual indices, for qualities analysis and control. This evaluation model of IC wire bonding will make it easy for engineers to control the procedure, improving yield and qualities.

Key words: IC Wire Bonding Process; Multi-Characteristic; Process Capability Indices; MPCAC

致 謝

歲月荏苒，研究所的時光匆匆就過了，回想當年還在考慮是否繼續求學，如今卻已完成了學業。這兩年中，部隊任務不斷、學校課業不放，學著如何分配時間、學著提高做事效率、學著與同事協調工作，雖然兩頭忙，終究還是熬過了。在論文落下最後一筆之前，想想能過順利的完成學業，應該感謝的人實在很多。

首先感謝一路走來的同學們，大家互相鼓勵、交流資訊，使得全班都能齊頭並進，一起成長一起學習。感謝部隊的同事，體諒我課業的忙碌，總是盡量讓我準時到課，而工作上的幫助，讓我在最後這段時間能專心的為論文衝刺。感謝康鶴耀博士、吳建瑋博士兩位口試委員，給了我許多指導與建議，使本論文更臻完善。而在這兩年內，最感謝莫過於指導教授林碧川博士的諄諄教誨與細心指導，知無不言、言無不盡，使我從不懂、似懂非懂到完成論文著作，期間所花的心血不可言喻，而對於論文的嚴謹與要求更使我戰戰兢兢、不敢鬆懈。

最後，感謝家人的支持、包容與關懷，讓我能無後顧之憂，安心的攻讀碩士學位。僅將此成果與榮耀與你們共同分享。

賴銘悠 謹誌於
國立勤益科技大學
工業工程與管理系研究所
中華民國九十九年六月

目 錄

摘要	i
Abstract	ii
致謝	iii
目錄	iv
表目錄	v
圖目錄	vi
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究範圍與限制	1
1.3 研究架構	2
第二章 文獻探討	3
2.1 製程能力指標	3
2.2 多重製程的製程能力評估	7
2.3 製程能力指標 C_{pu} 與 C_{pl} 的估計量	8
2.4 製程能力指標 S_{pk} 的估計量	9
2.5 IC鉀線製程	10
第三章 研究方法	14
3.1 製程能力分析與多重製程能力分析圖建立	14
3.2 製程能力指標 C_{pl} 與 S_{pk} 信賴下界	15
3.3 評估步驟	16
第四章 實例探討	17
4.1 樣本抽樣	17
4.2 製程能力指標計算與MPCAC建構	21
4.3 製程能力分析	23
第五章 結論	24
參考文獻	25
附錄 Maple程式	27
附表	32

表 目 錄

表1	C_{pk} 與不良品數目(PPM)之比較	4
表2	S_{pk} 值、製程能力、良率與不良品數之關係.....	6
表3	樣本數 n 與 b_{n-1} 值.....	9
表4	鐳線製程品質特性與製程能力指標	14
表5	品質特性與製程規格	21
表6	望大品質特性之製程能力	21
表7	望目品質特性之製程能力	22
附表1	信賴下界 C_U	32
附表2	鐳線抗拉力樣本資料($LSL = 2g$).....	33
附表3	金球抗推力樣本資料($LSL = 5.3g$).....	34
附表4	金球X軸徑尺寸樣本資料(LSL, T, USL) = (40, 46, 52).....	35
附表5	金球Y軸徑尺寸樣本資料(LSL, T, USL) = (40, 46, 52).....	36
附表6	金球Z軸徑尺寸樣本資料(LSL, T, USL) = (7, 8.5, 10).....	37

圖目錄

圖 1	多重製程能力分析圖(MPCAC)	8
圖 2	單邊模塑成型 PBGA	10
圖 3	上覆式模塑成型 PBGA	11
圖 4	鐳線接合	11
圖 5	金球 XYZ 三軸向直徑	11
圖 6	鐳線作業流程	12
圖 7	鐳線抗拉力樣本資料直方圖	17
圖 8	鐳線抗拉力樣本資料常態機率圖	17
圖 9	金球抗推力樣本資料直方圖	18
圖 10	金球抗推力樣本資料常態機率圖	18
圖 11	X 軸向直徑樣本資料直方圖	19
圖 12	X 軸向直徑樣本資料常態機率圖	19
圖 13	Y 軸向直徑樣本資料直方圖	20
圖 14	Y 軸向直徑樣本資料常態機率圖	20
圖 15	Z 軸向直徑樣本資料直方圖	20
圖 16	Z 軸向直徑樣本資料常態機率圖	21
圖 17	各品質特性之 MPCAC	22

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

台灣半導體產業發展始於 1970 年初期，近年來因半導體研發科技的快速進步，使得半導體產業成為台灣重要的經濟基礎，目前在世界上已居領導地位。

在半導體的製造過程中，屬於後段製程的封裝技術，目的在於建構 IC 元件完整的組織架構，同時也在保護元件，避免製造過程中因外力或環境的影響，產生物理性質的破壞或化學性質的變化，影響 IC 效能；另外一方面，封裝後的 IC 具有美觀整齊的外表，並為使用者提供了安全及簡便的操作介面。IC 封裝製程包括晶圓切割、黏合固定、封膠、印字、剪切成型、系統組合等，以至產品完成之間的所有製程。隨著 IC 產品需求量增加，推動了電子封裝產業蓬勃發展。在 IC 晶片「輕、薄、短、小、功能高」之要求下，亦使得封裝技術不斷推陳出新，以符合 IC 元件產品之需要並進而充分發揮其功能。

為使 IC 晶片發揮電子訊號傳遞的功能，必須與封裝基板或導線架完成電路的連接才能將電路訊號傳輸到外界。其中鐳線接合(Wire Bonding)、卷帶自動接合(Tape Automated Bonding, TAB)與覆晶接合(Flip Chip, FC)為電子封裝中主要的電路聯線方法，而鐳線接合目前仍屬於最佳的方式。(鍾文仁等人，2005)

製程能力指標 (Process Capability Indices, PCIs) 被用來評估產品品質是否合乎要求，一般製程能力指標大都應用在單一品質特性的產品績效評估上，而 IC 鐳線接合則屬於多品質特性製程。在半導體產業中，產品的良率為評估公司生產能力的指標之一，良率的高低直接影響整個公司之生產製造成本與獲益能力，因此本研究將利用 Huang *et al.* (2002) 所提出的多製程能力分析圖 (Multi-Process Capability Analysis Chart, MPCAC)，結合製程良率的計算與信賴下界的建立，來進行品質分析與管制，目標在為 IC 鐳線製程提供一套完整的評估模式，並使業者容易管控鐳線製程，提高品質良率。

1.2 研究範圍與限制

本文以位於台灣的某精密公司 IC 塑膠球格陣列 (Plastic Ball Grid Array, PBGA) 封裝製程中鐳線接合為分析對象，收集實際相關數據，以本文所提出的製程能力分析為方法，並利用數學軟體 Maple 與統計軟體 Minitab 來做相關的運算。

本文中使用的樣本與製程能力分析特性方面，其假設與限制如下：

1. 本文是以 IC PBGA 封裝製程中鐳線接合為研究對象，其製程必須是穩定，並排除各種突發狀況的發生。
2. 本研究中的樣本必須遵循常態分配或近似常態分配。

1.3 研究架構

本文的研究架構順序說明如下：

第一章 緒論。說明研究動機與目的、研究範圍與限制以及研究架構。

第二章 文獻探討。針對本研究範圍、目的、方法與產業背景做相關文獻探討及回顧。

第三章 研究方法。以計算相關製程能力指標、設定信賴下界與多重製程能力分析圖(Multi-process Capability Analysis Chart, MPCAC)，來進行品質分析與管制。

第四章 實例探討。利用第三章所提出的分析方法，對於實際 IC 鍍線案例，做製程能力分析與檢定，以檢視該製程品質的良莠。

第五章 結論。針對本研究的結果做一總結，並提出未來研究方向與期許。



第二章 文獻探討

製程能力指標將品質量化，為製程績效的重要衡量指標。製程能力指標經過學者多年的發展，已有多種面像，其原理為對於所關注的品質特性，經由樣本訊息，計算製程參數值，再透過與預設之規格參數比較，來衡量製程績效。

本章中將介紹常見的製程能力指標，再進一步介紹單一產品多品質特性的衡量方式，最後再說明本文實例探討「IC 鐳線」的基本背景與介紹。

2.1 製程能力指標

製程規格(Specification)可區分為：

1. 單邊製程規格：
 - (1) 於製程規格中僅設定規格下限(Lower Specification Limit, LSL)，產製品具有望大型之品質特性，品質特性之量測值愈大愈好。
 - (2) 於製程規格中僅設定規格上限(Upper Specification Limit, USL)，產製品具有望小型之品質特性，品質特性之量測值愈小愈好。
2. 雙邊製程規格：製程規格同時設定規格上限(USL)與規格下限(LSL)，其製程目標值 T 落於規格區間，產製品具有望目之品質特性。當製程目標值 T 設定於規格區間中點 $m = (USL+LSL)/2$ 時，即 $T = m$ 時，稱製程具有對稱的(Symmetric)規格區間；當製程目標值 T 不等於規格區間中點 m 時，即 $T \neq m$ 時，稱製程具有非對稱的(Asymmetric)規格區間。

製程能力指標被用來評估產品是否達到品質要求，已經有許多指標應用於製造業，包含 C_p 、 C_{pk} 、 C_{pu} 、 C_{pl} 、 C_a 等基本指標，分別介紹如下。

2.1.1 製程能力指標 C_p

Kane 於 1986 年所提出製程能力指標 C_p ，為最早之製程能力指標，亦是應用最廣的指標之一。其定義如下：

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}, \quad (1)$$

其中 USL 為規格上限， LSL 為規格下限， σ 為製程標準差， σ^2 為製程變異數。當 σ 愈小， C_p 值愈大，代表產品品質特性愈集中，製程能力愈大。對於遵循常態分配的製程，在製程平均數 μ 等於製程規格中心點 m ，即 $\mu = m$ 時， $C_p = 1$ 表示 $(USL - LSL) = 6\sigma$ ，此時製程良率為 99.73%、不良率為 2700 PPM。

Kotz and Lovelace (1998) 指出當 $C_p < 1$ 時，所對應的製程是不具能力的(Incapable)； $1 < C_p < 1.33$ 時，所對應的製程變異數有過大之風險，仍應予留意； $C_p > 1.33$ 時，所對應的製程是有能力的(Capable)，須保持。

2.1.2 製程能力指標 C_{pk} 、 C_{pl} 、 C_{pu}

製程能力指標 C_p 僅顯現製程之穩定度，並未反應製程平均數的偏差，因此 Kane (1986) 提出修正指標 C_{pk} ，說明除了製程標準差 σ 會影響製程能力外，製程平均數 μ 也是評估製程能力的重要因子，其定義如下：

$$C_{pk} = \min\{C_{pl}, C_{pu}\} = \frac{d - |\mu - m|}{3\sigma}, \quad (2)$$

其中 $d = (USL - LSL)/2$ 為半個規格區間長度， $m = (USL + LSL)/2$ 為規格區間的中點，而製程能力指標 C_{pl} 、 C_{pu} 適用於評估單邊規格的製程，分別評估僅設定規格下限 LSL 的望大製程與規格上限 USL 的望小製程， C_{pl} 與 C_{pu} 分別定義如下：

$$C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}, \quad (3)$$

$$C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3\sigma}. \quad (4)$$

當製程規格僅設定規格下限 (LSL) 時，該製程平均數 μ 愈遠離規格下限，該製程能力愈好，即成品特性愈大愈好 (望大)；反之，若製程規格僅設定規格上限 (USL) 時，該製程平均數 μ 愈遠離規格上限，該製程能力愈好，即成品特性愈小愈好 (望小)。在 σ 固定的情形下，當 μ 愈接近規格區間中點 m 時， C_{pk} 值愈大，代表製程能力愈好；當 $\mu \geq USL$ 或 $\mu \leq LSL$ 時， $C_{pk} \leq 0$ ，表示製程極不穩定，須立即改善，一般業界要求 $C_{pk} \geq 1$ 。Boyles (1991) 指出 $C_{pk} = c$ 對應的製程良率 $\%Yield$ 介於 $2\Phi(3c) - 1$ 與 $\Phi(3c)$ 之間，即 $2\Phi(3c) - 1 \leq \%Yield \leq \Phi(3c)$ 。故 Wu (2004) 將 C_{pk} 值與以「每百萬個成品中不良品數 (Parts Per Million, PPM)」表示的不良率 ($1 - \%Yield$) 比較後，整理如表 1 所示。例如， $C_{pk} = 1.24$ 所對應製程的不良率介於 100 PPM 與 200 PPM 之間。

表1 C_{pk} 與不良品數目 (PPM) 之比較

C_{pk} 值	下界	上界	C_{pk} 值	下界	上界
0.60	35,930	71,861	1.33	33	66
0.70	17,864	35,729	1.40	13	27
0.80	8,198	16,395	1.45	6.807	13.614
0.90	3,467	6,934	1.50	3.398	6.795
1.00	1,350	2,700	1.60	0.793	1.587
1.10	483	967	1.67	0.272	0.544
1.20	159	318	1.70	0.170	0.340
1.24	100	200	1.80	0.033	0.067
1.25	88	177	1.90	0.006	0.012
1.30	48	96	2.00	0.001	0.002

資料來源：Wu (2004)

2.1.3 製程能力指標 C_a

Pearn *et al.* (1998) 提出了一個可以評估製程精確度的能力指標 C_a ，其定義如下：

$$C_a = 1 - \frac{|\mu - m|}{d}, \quad (5)$$

和之前相同， C_a 定義中的 μ 為製程平均數， $d = (USL - LSL)/2$ 為半個規格區間長度， $m = (USL + LSL)/2$ 為規格區間的中點。很明顯的，當製程平均數 μ 遠離 m 時， C_a 值愈小，表示製程愈不精確，製程損失愈大。相反的，當製程平均數 μ 趨近 m 時， C_a 值愈接近 1，製程愈精確。當 $\mu = m$ 時， C_a 值等於 1 時，表示製程完全沒有偏移。所以， C_a 亦稱之為製程精確度指標。當 C_a 運用於在對稱規格區間製程時，製程目標值 $T = m$ ，當 $C_a < 0.875$ 表示製程精確度不足，需要改善製程平均數偏離目標值的問題；當 $C_a \geq 0.875$ 則表示製程有良好的精確度。

C_a 與指標 C_{pl} 、 C_{pu} 之間的關係可表示為：

$$C_a = 1 - \frac{|C_{pu} - C_{pl}|}{|C_{pu} + C_{pl}|}. \quad (6)$$

2.1.4 製程良率與良率指標 S_{pk}

製程良率(Yield)為產品落於規格區間內的機率，即 $LSL \leq X \leq USL$ 的機率，若規格為雙邊的， $F(\cdot)$ 為 X 的累積分配函數(Cumulative Distribution Function, CDF)，則良率 %Yield 為：

$$\%Yield = P(LSL \leq X \leq USL) = F(USL) - F(LSL). \quad (7)$$

若 X 遵循常態分配 $N(\mu, \sigma^2)$ ， $\Phi(\cdot)$ 為常態分配 $N(0, 1)$ 的 CDF，則良率可寫成：

$$\begin{aligned} \%Yield &= \Phi[(USL - \mu)/\sigma] - \Phi[(LSL - \mu)/\sigma] \\ &= \Phi[(USL - \mu)/\sigma] - \Phi[-(\mu - LSL)/\sigma] \\ &= \Phi[(USL - \mu)/\sigma] - \{1 - \Phi[(\mu - LSL)/\sigma]\} \\ &= \Phi[3(USL - \mu)/(3\sigma)] - \{1 - \Phi[3(\mu - LSL)/(3\sigma)]\} \\ &= \Phi(3C_{pu}) + \Phi(3C_{pl}) - 1. \end{aligned} \quad (8)$$

由上式可知，當 X 遵循常態分配 $N(\mu, \sigma^2)$ 之製程所對應的良率為：
 $\%Yield = \Phi(3C_{pu}) + \Phi(3C_{pl}) - 1$ 。

而對於單邊規格望小與望大的製程良率分別為： $\%Yield = P(X < USL)$ 與 $\%Yield = P(X > LSL)$ ，即 $\%Yield = \Phi(3C_{pu})$ 與 $\%Yield = \Phi(3C_{pl})$ 。

Boyles (1994) 對遵循常態分配的製程，提出良率指標(Yield Index) S_{pk} ，其定義如下：

$$S_{pk} = \frac{1}{3} \Phi^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{USL - \mu}{\sigma}\right) + \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{\mu - LSL}{\sigma}\right) \right\}, \quad (9)$$

其中 $\Phi^{-1}(\cdot)$ 為 $\Phi(\cdot)$ 的反函數。 S_{pk} 可藉由指標 C_{pl} 和 C_{pu} 表示成：

$$S_{pk} = \frac{1}{3} \Phi^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \Phi(3C_{pu}) + \frac{1}{2} \Phi(3C_{pl}) \right\} \quad (10)$$

因此，

$$\Phi(3S_{pk}) = \frac{1}{2} \Phi(3C_{pu}) + \frac{1}{2} \Phi(3C_{pl}) ,$$

$$2\Phi(3S_{pk}) = \Phi(3C_{pu}) + \Phi(3C_{pl}) \text{。}$$

由(8)式可得：

$$\%Yield = 2\Phi(3S_{pk}) - 1 \text{。} \quad (11)$$

假如 $S_{pk} = c$ ，則製程良率可表示為 $\%Yield = 2\Phi(3c) - 1$ ，顯然的， S_{pk} 與製程良率 $\%Yield$ 之間有一對一的關係。因此， S_{pk} 能夠計算製程良率的精確值。而當 $C_{pk} = c$ 時僅知對應的製程良率介於 $2\Phi(3c) - 1$ 與 $\Phi(3c)$ 之間，即 $2\Phi(3c) - 1 \leq \%Yield \leq \Phi(3c)$ ，所以 S_{pk} 較 C_{pk} 更能夠精確反應製程良率。

Pearn *et al.* (2004) 指出當製程遵循常態分配時， S_{pk} 值、製程能力、良率與不良品數目 (PPM) 有如表 2 之關係。

表2 S_{pk} 值、製程能力、良率與不良品數之關係

S_{pk} 值	製程能力	良率	不良品數目 (PPM)
$S_{pk} = 1.00$	有能力 (Capable)	0.9973002039	2699.796
$S_{pk} = 1.33$	令人滿意 (Satisfactory)	0.9999339267	66.073
$S_{pk} = 1.50$	良好 (Good)	0.9999932047	6.795
$S_{pk} = 1.67$	極佳 (Excellent)	0.9999994557	0.544
$S_{pk} = 2.00$	超級 (Super)	0.9999999980	0.002

資料來源：Pearn *et al.* (2004)

我們可以將(9)式改寫成以下關係，其中 $C_{dr} = (\mu - m)/d$ 為製程平均數與規格中心之偏離比， $C_{dp} = \sigma/d$ 為製程變異數與規格區間之比值，且於對稱規格區間製程中 $m = T$ 。

$$S_{pk} = \frac{1}{3} \Phi^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{USL - \mu}{\sigma}\right) + \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{\mu - LSL}{\sigma}\right) \right\}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{3} \Phi^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{1 - (\mu - m)/d}{\sigma/d} \right) + \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{1 + (\mu - m)/d}{\sigma/d} \right) \right\} \\
&= \frac{1}{3} \Phi^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{1 - C_{dr}}{C_{dp}} \right) + \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{1 + C_{dr}}{C_{dp}} \right) \right\}. \tag{12}
\end{aligned}$$

以上僅適用於單品質特性的製程，而對於多品質特性製程總 S_{pk} 值的計算，Chen *et al.* (2003) 提出了一良率總指標 S_{pk}^T ，其定義如下：

$$S_{pk}^T = \frac{1}{3} \Phi^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \prod_{j=1}^{\nu} (2\Phi(3S_{pkj}) - 1) \right] \right\}, \tag{13}$$

其中 S_{pkj} 為第 j 個品質特性之指標 S_{pk} 值， ν 為製程品質特性總數(假設針對此 ν 個品質特性皆訂有雙邊製程規格)。由於第 j 個品質特性之良率 %Yield 為 $P_{sj} = 2\Phi(3S_{pkj}) - 1$ ，因此製程總良率 P^T ：

$$P^T = \prod_{j=1}^{\nu} P_{sj} = \prod_{j=1}^{\nu} [2\Phi(3S_{pkj}) - 1] = 2\Phi(3S_{pk}^T) - 1. \tag{14}$$

混雜有 n_l 個望大、 n_u 個望小與 n_s 個望目之多品質特性多重製程的製程總良率 P^T 即為：

$$P^T = \prod_{j=1}^{n_l} P_{lj} \cdot \prod_{j=1}^{n_u} P_{uj} \cdot \prod_{j=1}^{n_s} P_{sj} = \prod_{j=1}^{n_l} \Phi(3C_{plj}) \cdot \prod_{j=1}^{n_u} \Phi(3C_{puj}) \cdot \prod_{j=1}^{n_s} [2\Phi(3S_{pkj}) - 1]. \tag{15}$$

2.2 多重製程的製程能力評估

一個產品通常由許多品質特性所組成，品質特性可區分成望大、望小或望目特性，傳統的製程能力指標不適用於評估多品質特性的多重製程，Huang *et al.* (2002) 提出下列製程能力總指標 C_T 來評估多品質特性的多重製程。

$$C_T = \frac{1}{3} \Phi^{-1} \left(\frac{1}{2} \left[1 + \prod_{i \in w} \prod_{j=1}^{n_i} (2\Phi(3C_{pij}) - 1) \right] \right), \quad w = \{u, l, s\}, \tag{16}$$

其中 $C_{ps} = S_{pk}$ ， n_i 為多重製程數目。由(6)與(10)式可知 C_a 與 $C_{ps}(= S_{pk})$ 皆為 C_{pu} 與 C_{pl} 的函數。Huang *et al.* (2002) 以 C_{pu} 為 X 軸、 C_{pl} 為 Y 軸，配合製程精確度指標 C_a 與良率指標 C_{ps} ，繪出多重製程能力分析圖 (Multi-process Capability Analysis Chart, MPCAC)，如圖 1 所示。當製程品質特性為單邊規格時，將落於 X 軸(C_{pu})或 Y 軸(C_{pl})；當品質特性為雙邊規格時，將落於座標內(C_{ps})，並配合 C_a 值，求得製程精確度，同時監控制程良率與製程精確度。

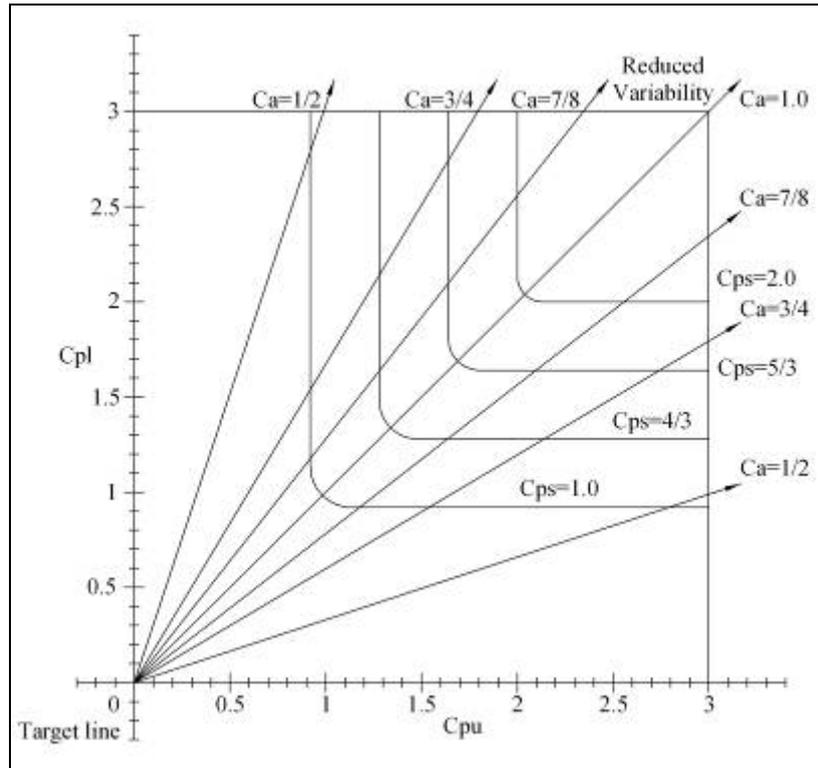


圖1 多重製程能力分析圖(MPCAC)

資料來源：Huang *et al.* (2002)

2.3 製程能力指標 C_{pu} 與 C_{pl} 的估計量

在一穩定的製程中，隨機樣本數 n ，其樣本平均數 \bar{X} 與樣本變異數 S^2 可表示為：

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}, \quad (16)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (17)$$

而 C_{pu} 與 C_{pl} 的自然估計量分別為：

$$\hat{C}_{pu} = \frac{USL - \bar{X}}{3S}, \quad (18)$$

$$\hat{C}_{pl} = \frac{\bar{X} - LSL}{3S}. \quad (19)$$

Chou and Owen (1989) 指出在常態假設下，估計量 \hat{C}_{pu} 與 \hat{C}_{pl} 之分配為

$(3\sqrt{n})^{-1}T_{n-1}(\delta)$ ，其中 $T_{n-1}(\delta)$ 為自由度 $n-1$ 的 noncentral t 分配，非中參數分別為 $\delta = 3\sqrt{n}C_{pu}$ 與 $\delta = 3\sqrt{n}C_{pl}$ 。Pearn and Chen (2002) 指出 \hat{C}_{pu} 與 \hat{C}_{pl} 二個估計量均為有偏的估計量 (Biased Estimator)，並導入一校正因子 b_{n-1} ，使得 $\tilde{C}_{pu} = b_{n-1}\hat{C}_{pu}$ 及 $\tilde{C}_{pl} = b_{n-1}\hat{C}_{pl}$ 分別為 C_{pu} 與 C_{pl} 的不偏估計量 (Unbiased Estimator)，即 $E(\tilde{C}_{pu}) = C_{pu}$ 、 $E(\tilde{C}_{pl}) = C_{pl}$ ，其中校正因子 b_{n-1} 為：

$$b_{n-1} = \sqrt{\frac{2}{n-1} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) / \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right)}。 \quad (21)$$

Pearn and Chen (2002) 更進一步指出 \tilde{C}_{pu} 、 \tilde{C}_{pl} 分別為 C_{pu} 與 C_{pl} 之均勻最小變異不偏估計量 (Uniformly Minimum Variance Unbiased Estimator, UMVUE)。樣本數 n 與 b_{n-1} 的關係如表 3。 b_{n-1} 的值亦可以附錄 1 所列之 Maple 程式計算。

表 3 樣本數 n 與 b_{n-1} 值

n	b_{n-1}												
10	0.914	45	0.983	80	0.990	115	0.993	150	0.995	185	0.996	220	0.997
15	0.945	50	0.985	85	0.991	120	0.994	155	0.995	190	0.996	225	0.997
20	0.960	55	0.986	90	0.992	125	0.994	160	0.995	195	0.996	230	0.997
25	0.968	60	0.987	95	0.992	130	0.994	165	0.995	200	0.996	235	0.997
30	0.974	65	0.988	100	0.992	135	0.994	170	0.996	205	0.996	240	0.997
35	0.978	70	0.989	105	0.993	140	0.995	175	0.996	210	0.996	245	0.997
40	0.981	75	0.990	110	0.993	145	0.995	180	0.996	215	0.996	250	0.997

資料來源：Pearn and Chen (2002)

2.4 製程能力指標 S_{pk} 的估計量

若遵循常態分配的樣本 X_1, \dots, X_n 來自在一穩定的製程，樣本數 n ，樣本平均數為 \bar{X} 與樣本變異數為 S^2 ，則 S_{pk} 的自然估計量 \hat{S}_{pk} 可表示為：

$$\hat{S}_{pk} = \frac{1}{3} \Phi^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{1 - \hat{C}_{dr}}{\hat{C}_{dp}} \right) + \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{1 + \hat{C}_{dr}}{\hat{C}_{dp}} \right) \right\} = \frac{1}{3} \Phi^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \Phi(3\hat{C}_{pu}) + \frac{1}{2} \Phi(3\hat{C}_{pl}) \right\}, \quad (22)$$

其中 $\hat{C}_{dr} = (\bar{X} - T)/d$ 、 $\hat{C}_{dp} = S/d$ 分別為 C_{dr} 與 C_{dp} 的自然估計量。Lee *et al.* (2002) 將 \hat{S}_{pk} 以泰勒展開式改寫為：

$$\hat{S}_{pk} = S_{pk} + \frac{1}{6\sqrt{n}} \frac{W}{\phi(3S_{pk})} + O_P(n^{-1}), \quad (23)$$

其中

$$W = -\frac{d}{2\sigma^3} Y \left[(1 + C_{dr}) \phi \left(\frac{1 + C_{dr}}{C_{dp}} \right) + (1 - C_{dr}) \phi \left(\frac{1 - C_{dr}}{C_{dp}} \right) \right]$$

$$-\frac{1}{dC_{dp}} Z \left[\phi \left(\frac{1-C_{dr}}{C_{dp}} \right) - \phi \left(\frac{1+C_{dr}}{C_{dp}} \right) \right], \quad (24)$$

且 $Y = \sqrt{n}(S^2 - \sigma^2)$ 、 $Z = \sqrt{n}(\bar{X} - \mu)$ ，而 $\phi(\cdot)$ 為常態分配 $N(0,1)$ 的機率密度函數 (Probability Density Function, PDF)。Lee *et al.* (2002) 指出 \hat{S}_{pk} 遵循漸近常態分配 $N(S_{pk}, (a^2 + b^2)/[36n(\phi(3S_{pk}))^2])$ ，其中

$$a = \frac{d}{\sqrt{2}\sigma} \left\{ (1-C_{dr})\phi \left(\frac{1-C_{dr}}{C_{dp}} \right) + (1+C_{dr})\phi \left(\frac{1+C_{dr}}{C_{dp}} \right) \right\}, \quad (25)$$

$$b = \phi \left(\frac{1-C_{dr}}{C_{dp}} \right) - \phi \left(\frac{1+C_{dr}}{C_{dp}} \right). \quad (26)$$

2.5 IC 鐳線製程

IC 封裝是利用塑膠或陶瓷包裝晶體與配線成電子迴路，賦予 IC 元件一套完整的構架，主要旨在保護晶體使其不受外在環境影響，並將電子訊號傳送到外部以供使用。而球格陣列 (Ball Grid Array, BGA) 封裝技術則是美國 Motorola 與日本 Citizen 公司為了因應封裝多腳化的需求共同開發而來，以有機基板及陣列式的錫球取代傳統的導線架，作為 IC 元件對外輸出或輸入端及晶片的承載。鍾文仁等人(2005) 指出球格陣列封裝提供了較佳的組裝、較優異的電子成型性與較高的 I/O 密度等優點。本研究中的 PBGA (Plastic BGA) 則是以 BT (Bismaleimide Triazine) 樹脂為基板，主要分為單邊模塑成型和上覆式模塑成型兩種，目前最常採用為單邊模塑成型，而上覆式模塑成型主要用於高腳數多層基板的 PBGA，優點在於減少基板側面的吸水現象。(鍾文仁等人，2005)

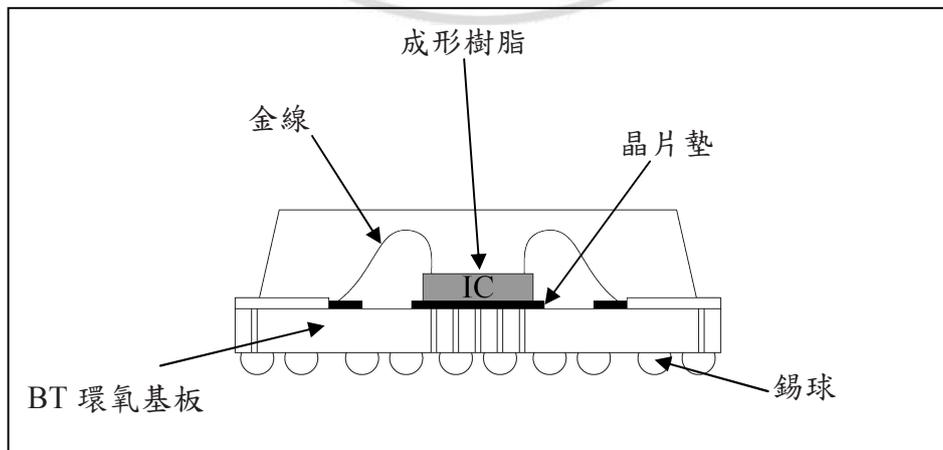


圖2 單邊模塑成型 PBGA

資料來源：鍾文仁等人(2005)，本研究重繪

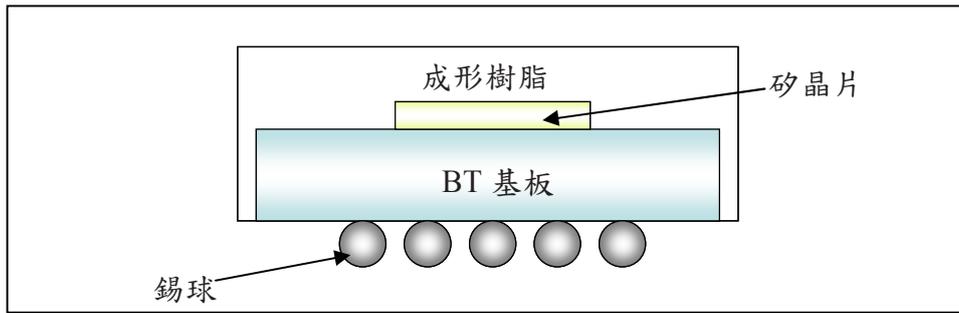


圖3 上覆式模塑成型 PBGA

資料來源：鍾文仁等人(2005)，本研究重繪

在 IC 封裝製程中，主要包括晶圓 (Wafer) 檢驗、晶背研磨、晶圓切割、上片、錫線、壓模、印字、植球切單等等。在這些製程中影響品質最鉅的則屬錫線製程，因為它直接影響到電子訊號迴路的好壞，即 IC 電子元件作用良好與否。雖然有許多晶片的電子訊號連接方式不是以錫線的方式連接，但經由超音波振盪所完成的錫線接合依舊是目前 IC 封裝產業中電子訊號連接主要方式。而金由於具有良好的抗氧化性、導電性與延展性，故超音波錫線接合中，以 99.99%純度的金線參雜部分鈹或銅作為標準線材。

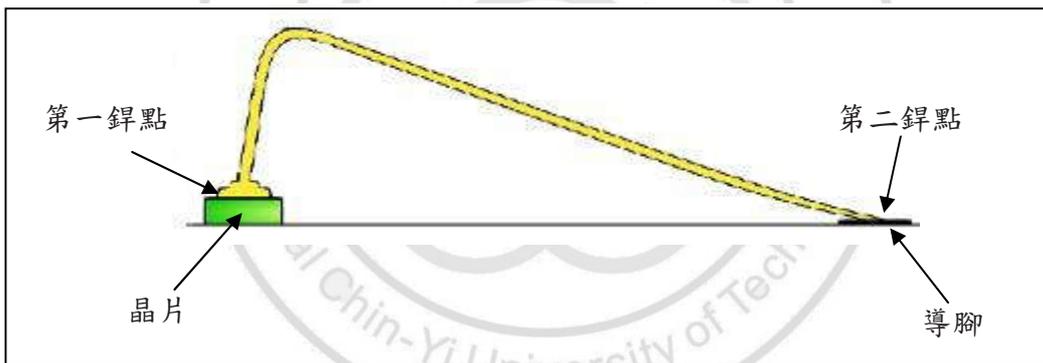


圖4 錫線接合

資料來源：張豐程(2003)，本研究重繪

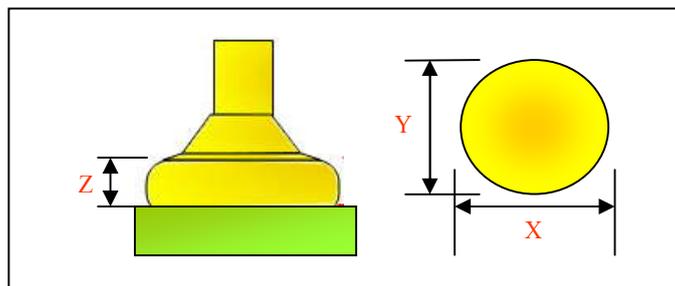


圖5 金球 XYZ 三軸向直徑

鐳線作業是先將金線穿入鐳針內，並預留一尾線，線尾靠電極高壓放電燒結成金球狀，經過機器的視覺系統辨識計算出晶片與導腳相關位置，便開始鐳線動作。鐳針開始下降，利用超音波的來回震盪提供能量，將金線與晶片上的鋁墊熔結在一起，再來鐳針上升開始在 XYZ 軸的方向做弧度，然後移動至導線架之內導腳，下壓將金線與導腳鐳接在一起，並靠鐳針的周圍將金線切斷，鐳針上升後，電極再把線尾燒結成金球狀，如此循環下去，鐳線接合如圖 4、圖 5 所示，作業流程如圖 6。

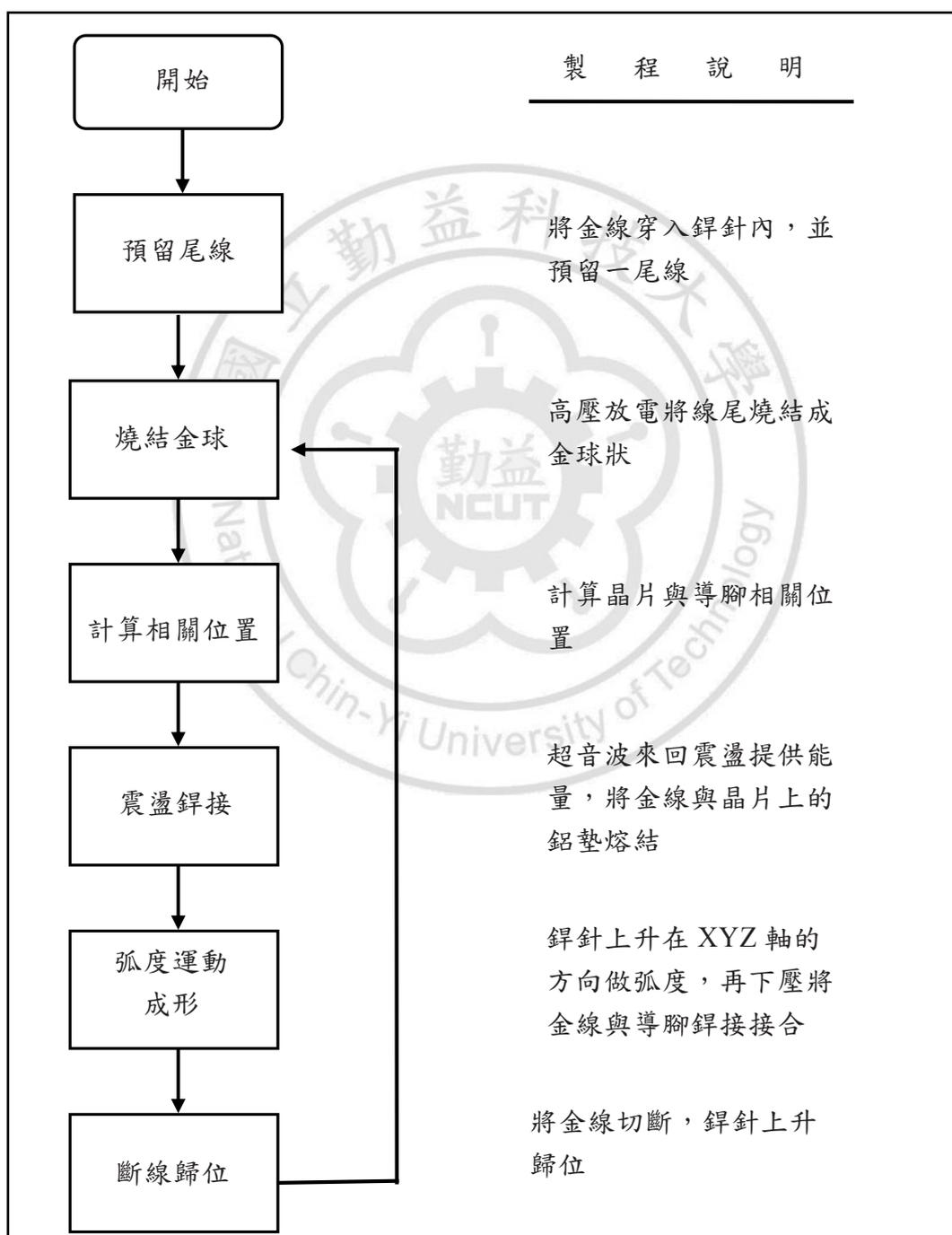


圖6 鐳線作業流程圖

在 IC 塑膠封裝的過程中，易因樹脂充填速度與黏度(Viscosity)所產生的拖曳力(Drag Force)、合模壓力與造成的氣泡移動、時間調配、導線架變形與晶片位移等等，而造成金線偏移，使得相鄰金線(金球)互相碰觸而造成短路，或衝斷分離金線(金球)接合點而造成斷路(徐瑞富，2005)，因此金球 XYZ 三軸向直徑大小(參閱圖 5)，鐳線完後引腳的黏著力，即鐳線抗拉強度(拉力)與能承受的剪應力(推力)，為影響鐳線製程品質好壞的因素。

本研究將對鐳線製程中五個關鍵品質特性：金球 XYZ 三軸向直徑大小、鐳線抗拉力、金球抗推力，做一研究分析，並提供業者鐳線製程能力分析的模型。



第三章 研究方法

3.1 製程能力分析與多重製程能力分析圖建立

產品可能同時具有多個單邊規格與雙邊規格品質特性，而每一個特性都必須要達到一定的製程能力，才能使最終產品達到顧客要求的品質。本研究塑膠球格陣列(PBGA)封裝銲線製程中，其銲線具有五個關鍵品質特性，分別是：金球XYZ三軸向直徑大小(望目)、銲線抗拉力(望大)、金球抗推力(望大)，因此必須針對各個關鍵品質特性進行製程能力分析。針對上述特性，本文以能力指標 $C_{ps}(=S_{pk})$ 來分析3個具望目特性之製程能力，以能力指標 C_{pl} 來分析2個具望大特性之製程能力，如下表所示。

表4 銲線製程品質特性與製程能力指標

品質特性	製程能力指標
金球 X、Y、Z 三軸向直徑大小	$C_{ps} = \frac{1}{3} \Phi^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{USL - \mu}{\sigma} \right) + \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{\mu - LSL}{\sigma} \right) \right\}$
銲線抗拉力、金球抗推力	$C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}$

因為每個品質特性都得達到一定水準，產品總製程方能達到顧客滿意，因此本文仿(16)式提出的製程能力總指標 C_T ，來求得最終產製品之製程能力：

$$C_T = \frac{1}{3} \Phi^{-1} \left(\frac{1}{2} \left[1 + \prod_{i \in w} \prod_{j=1}^{n_i} (2\Phi(3C_{pij}) - 1) \right] \right), w = \{l, s\}, n_l = 2, n_s = 3. \quad (27)$$

此外，藉由算出金球X、Y、Z三軸向直徑大小各別的 C_{ps} 值與銲線抗拉力、抗推力各別的 C_{pl} 值，標示於多重製程能力分析圖(MPCAC)，以進行製程能力分析。品質特性為望大的銲線抗拉力、金球抗推力之 C_{pl} 值將落於Y軸，而品質特性為望目的金球X、Y、Z三軸向直徑大小的指標值將落於 C_{ps} 與 C_a 組成的能力區塊(Capability Zone)中。

另外一方面，IC銲線製程中，在常態的假設下，品質特性為望大的製程良率 $\%Yield = P_{lj} = \Phi(3C_{plj})$ ，其中 $j = 1, 2$ 分別對應2個望大的品質特性：銲線抗拉力與金球抗推力。又品質特性為望目的製程良率 $\%Yield = P_{sj} = 2\Phi(3C_{psj}) - 1$ ，其中 $j = 1, 2, 3$ 分別對應3個望目的品質特性：金球X、Y、Z三軸向直徑大小。因此本文所探討的銲線製程的總良率可依(15)式表示如下：

$$P^T = \prod_{j=1}^2 P_{lj} \cdot \prod_{j=1}^3 P_{sj} = \prod_{j=1}^2 \Phi(3C_{plj}) \cdot \prod_{j=1}^3 [2\Phi(3C_{psj}) - 1]. \quad (28)$$

3.2 製程能力指標 C_{pl} 與 S_{pk} 信賴下界

由於多重製程能力分析圖(MPCAC)僅適用於產品全數檢驗的製程，對於隨機抽樣的抽檢，則易因抽樣誤差而導致製程能力評估失去精確性。因此本研究乃在製程為常態分配的假設下，導入 C_{pl} 與 S_{pk} 信賴下界結合多重製程能力分析圖，使該分析圖可以適用於抽檢的製程中。

3.2.1 C_{pl} 的信賴下界

Pearn and Chen (2002)指出 \tilde{C}_{pu} 、 \tilde{C}_{pl} 各為 C_{pu} 與 C_{pl} 之均勻最小變異不偏估計量 (UMVUE)，Pearn and Shu (2003)提供 Matlab 程式計算 C_{pu} 信賴下界 C_U ，也列出樣本數 $n = 5, 10, 15, \dots, 200$ 、 $\tilde{C}_{pu} = 0.7, 0.8, 0.9, \dots, 3.0$ 、信心水準 (Level of Confidence) 95% 的 C_{pu} 信賴下界 C_U ，擷取部分數值如附表 1。當由樣本資訊算出 $\tilde{C}_{pu} = C_u$ 時，經由 Pearn and Shu (2003)的附表查得 C_U 為 C_{pu} 相對應 $\tilde{C}_{pu} = C_u$ 具 95%信心水準的信賴下界，此時具 95%的信心認定 $C_{pu} \geq C_U$ 。由於 \tilde{C}_{pu} 與 \tilde{C}_{pl} 遵循的分配完全相同， C_{pu} 與 C_{pl} 的信賴下界也相等。因此 C_{pl} 相對應 $\tilde{C}_{pl} = C_0$ 的信賴下界 C_L 與 C_{pu} 相對應 $\tilde{C}_{pu} = C_0$ 的信賴下界 C_U 相等。

3.2.2 S_{pk} 信賴下界

對於遵循常態分配的製程，Lee *et al.* (2002) 指出 \hat{S}_{pk} 遵循近似常態分配 $N(S_{pk}, (a^2 + b^2)/[36n(\phi(3S_{pk}))^2])$ 。因此可得 S_{pk} 具有 $100(1-\alpha)\%$ 信心水準的近似信賴下界為：

$$\hat{S}_{pk} - \frac{\sqrt{\hat{a}^2 + \hat{b}^2}}{6\sqrt{n}\phi(3\hat{S}_{pk})} z_\alpha, \quad (29)$$

$$\text{其中 } \hat{a} = \frac{d}{\sqrt{2}S} \left\{ (1 - \hat{C}_{dr}) \phi\left(\frac{1 - \hat{C}_{dr}}{\hat{C}_{dp}}\right) + (1 + \hat{C}_{dr}) \phi\left(\frac{1 + \hat{C}_{dr}}{\hat{C}_{dp}}\right) \right\}, \quad (30)$$

$$\hat{b} = \phi\left(\frac{1 - \hat{C}_{dr}}{\hat{C}_{dp}}\right) - \phi\left(\frac{1 + \hat{C}_{dr}}{\hat{C}_{dp}}\right). \quad (31)$$

z_α 滿足 $P(Z \geq z_\alpha) = \alpha$ ，此處 $Z \sim N(0, 1)$ 。 z_α 也就是標準常態分配的第 $100(1-\alpha)$ 百分位。又由(22)式得知 $3\hat{C}_{pu} = \frac{1 - \hat{C}_{dr}}{\hat{C}_{dp}}$ 且 $3\hat{C}_{pl} = \frac{1 + \hat{C}_{dr}}{\hat{C}_{dp}}$ ，故我們可以將(30)與(31)式改寫成：

$$\hat{a} = \frac{1}{\sqrt{2}\hat{C}_{dp}} \left\{ (1 - \hat{C}_{dr}) \phi(3\hat{C}_{pu}) + (1 + \hat{C}_{dr}) \phi(3\hat{C}_{pl}) \right\}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \left(\frac{1-\hat{C}_{dr}}{\hat{C}_{dp}} \right) \phi(3\hat{C}_{pu}) + \left(\frac{1+\hat{C}_{dr}}{\hat{C}_{dp}} \right) \phi(3\hat{C}_{pl}) \right\} \\
&= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 3\hat{C}_{pu} \phi(3\hat{C}_{pu}) + 3\hat{C}_{pl} \phi(3\hat{C}_{pl}) \right\} \\
&= \frac{3}{\sqrt{2}} \left\{ \hat{C}_{pu} \phi(3\hat{C}_{pu}) + \hat{C}_{pl} \phi(3\hat{C}_{pl}) \right\}. \tag{32}
\end{aligned}$$

$$\hat{b} = \phi(3\hat{C}_{pu}) - \phi(3\hat{C}_{pl}). \tag{33}$$

附錄 2 為以 Maple 程式軟體試算當樣本數 n 為 100、 $\hat{C}_{pu} = 1.50$ 、 $\hat{C}_{pl} = 2.00$ 時，可得 \hat{S}_{pk} 信賴下界為 1.37。

3.3 評估步驟

根據本研究方法，對於 IC 錐線製程能力評估主要可分為下列五個步驟：

- 步驟一：對欲分析的品質特性進行樣本抽樣。
- 步驟二：計算各品質特性製程能力。
- 步驟三：計算 C_{pl} 與 S_{pk} 信賴下界。
- 步驟四：將步驟二所得之製程能力指標值繪於 MPCAC 上。
- 步驟五：進行製程能力分析。

第四章 實例探討

本章將對 IC 封裝銲線製程中的五個關鍵品質特性做一抽樣並進行製程能力分析。

4.1 樣本抽樣

1. 利用拉力機 (Wire Pulling Tester) 以拉弧工具將拉勾往下放置到欲勾取弧度位置的正下方，將銲接好的金線鉤住往上拉伸，直到金線拉斷為止。在測試拉力時，金球頸部、銲線本身及第二銲點(參見圖 4)是最有可能被破壞的三個地方。從抗拉強度(Tension Strength)與斷裂位置，可研判其品質的好壞並制定改善對策。本研究經抽樣共取得 180 筆數據資料，如附表 2，圖 7 為其樣本資料直方圖，圖 8 為其樣本常態機率圖。經由 Kolmogorov-Smirnov 適合度檢定，在 $\alpha=0.05$ 時， $P\text{-Value} > 0.15$ ，所以可知樣本資料遵循近似常態分配。

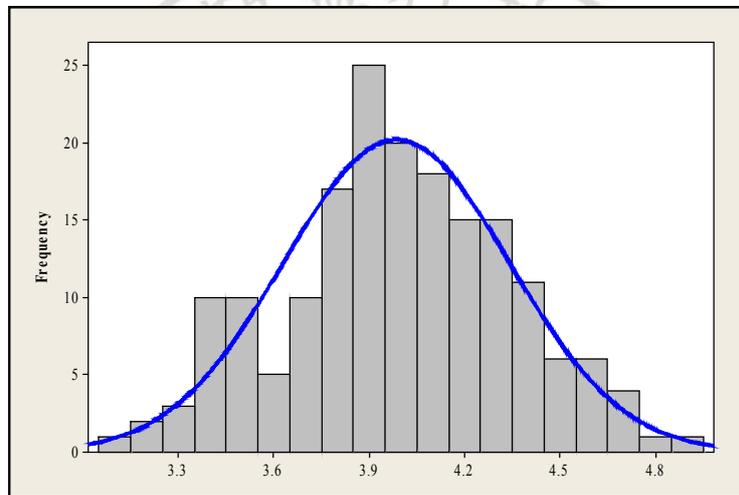


圖7 銲線抗拉力樣本資料直方圖

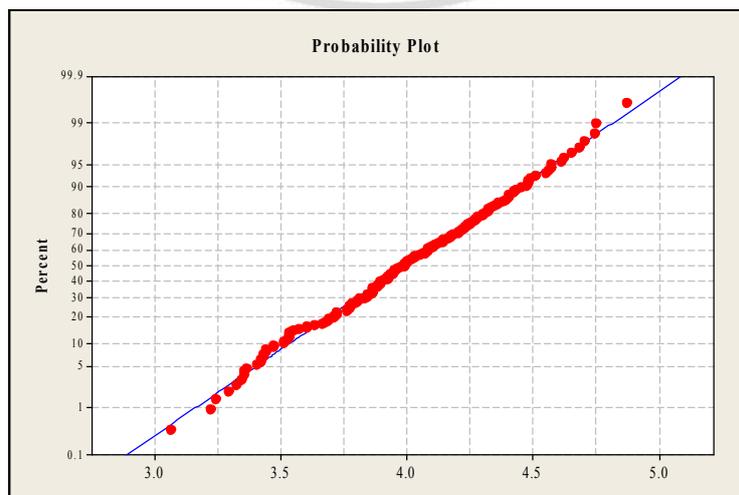


圖8 銲線抗拉力樣本資料常態機率圖

2. 利用推球機 (Ball Shearing Tester) 將第一銲點(參見圖 4)上的銲球推離分開銲接鋁墊；並以推力計來量測金球能承受的剪應力(Ball Shear Stress)，確保其第一銲點的銲接強度，在量測銲線完後金球銲點的黏著力是否達到品質要求。本研究經抽樣共取得 180 筆數據資料，如附表 3，圖 9 為其樣本資料直方圖，圖 10 為其樣本常態機率圖。經由 Kolmogorov-Smirnov 適合度檢定，在 $\alpha=0.05$ 時， $P\text{-Value} > 0.15$ ，所以可知樣本資料遵循近似常態分配。

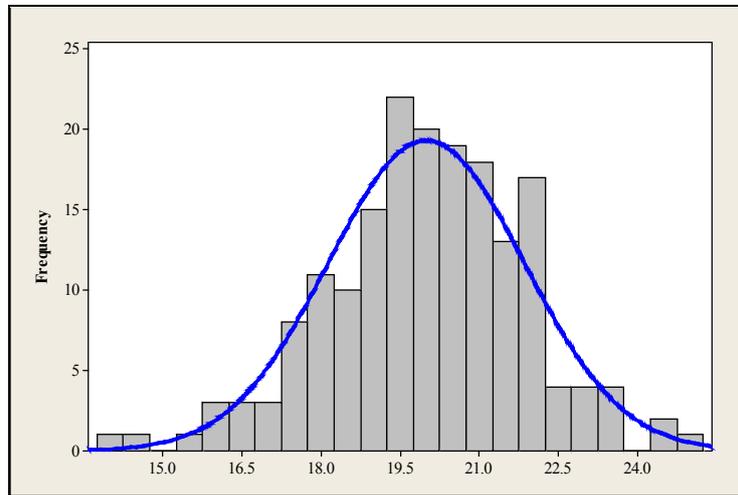


圖9 金球抗推力樣本資料直方圖

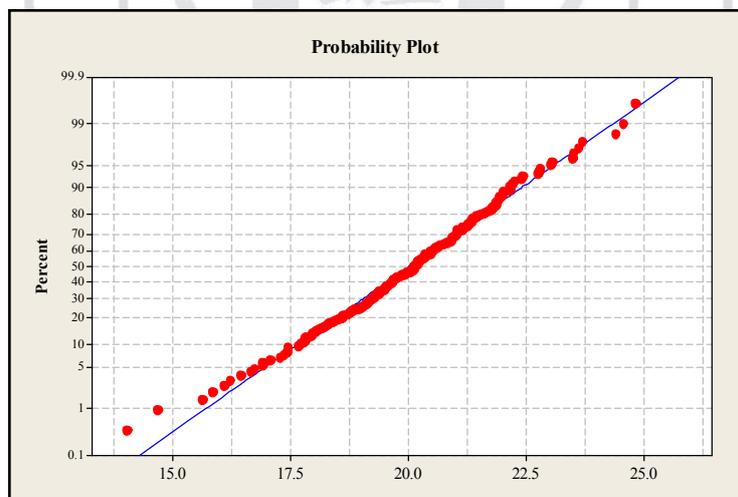


圖10 金球抗推力樣本資料常態機率圖

3. 使用工具顯微鏡，分別量得金球XYZ軸向直徑之數據資料，經抽樣分別取得各 180 筆數據資料，如附表 4~6。

金球 X 軸向直徑樣本資料直方圖如圖 11，樣本常態機率圖如圖 12。經由 Kolmogorov-Smirnov 適合度檢定，在 $\alpha=0.05$ 時， $P\text{-Value} > 0.15$ ，所以可知樣本資料遵循近似常態分配。

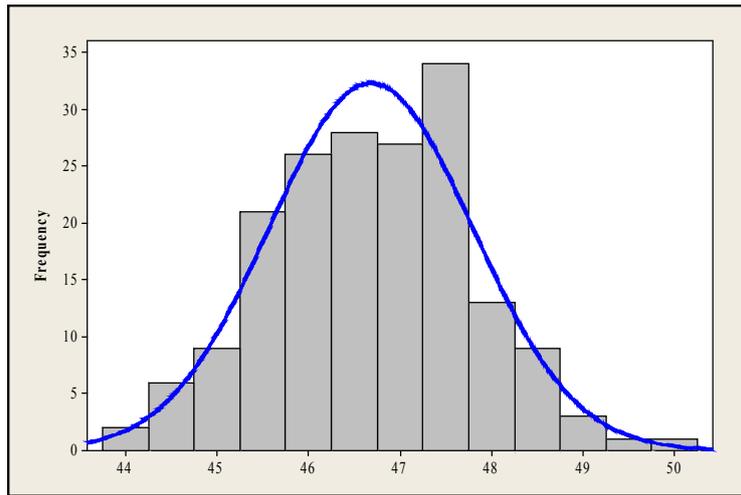


圖11 X 軸向直徑樣本資料直方圖

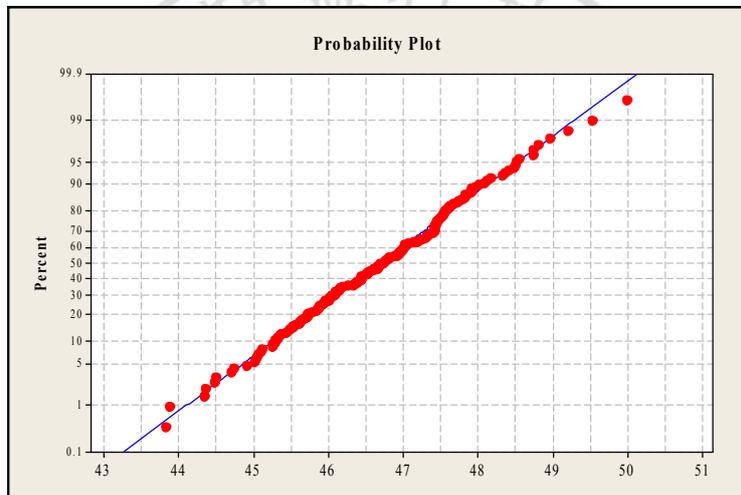


圖12 X 軸向直徑樣本資料常態機率圖

金球Y軸向直徑樣本資料直方圖如圖13，樣本常態機率圖如圖14。經由Kolmogorov-Smirnov適合度檢定，在 $\alpha = 0.05$ 時， $P\text{-Value} > 0.15$ ，所以可知樣本資料遵循近似常態分配。

金球Z軸向直徑樣本資料直方圖如圖15，樣本常態機率圖如圖16。經由Kolmogorov-Smirnov適合度檢定，在 $\alpha = 0.05$ 時， $P\text{-Value} > 0.15$ ，所以可知樣本資料遵循近似常態分配。

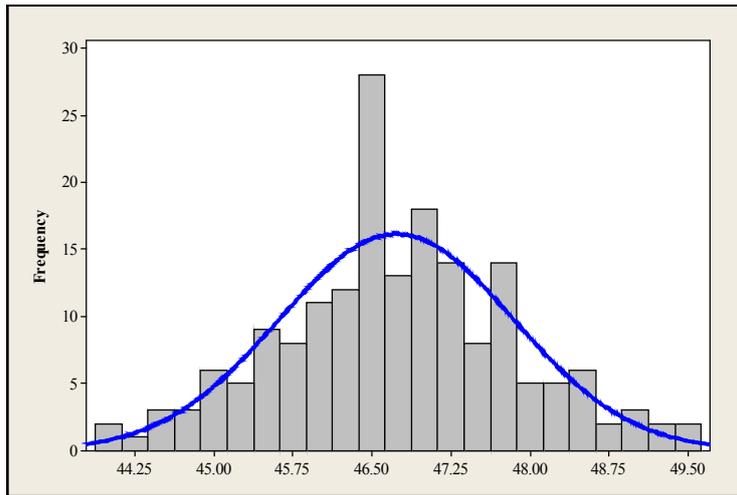


圖13 Y 軸向直徑樣本資料直方圖

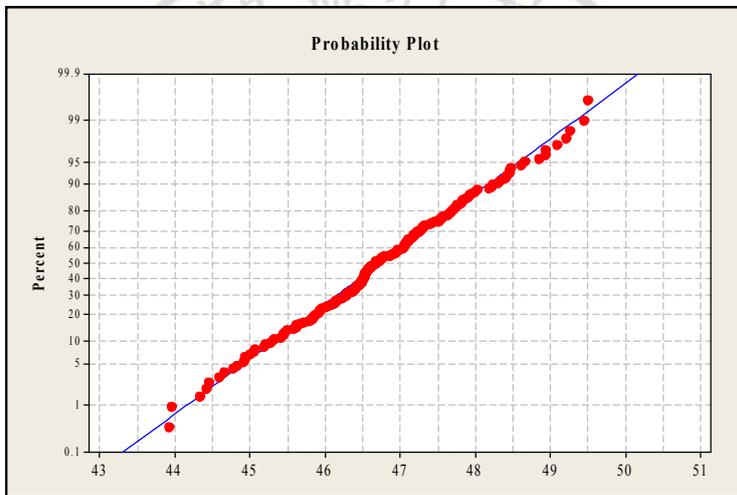


圖14 Y 軸向直徑樣本資料常態機率圖

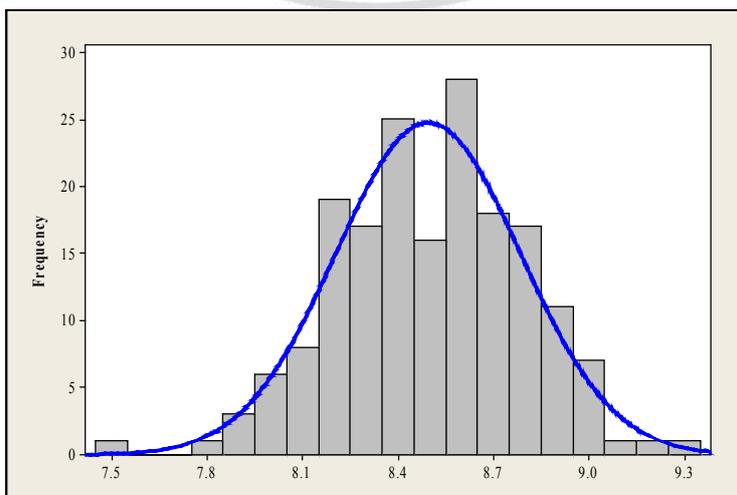


圖15 Z 軸向直徑樣本資料直方圖

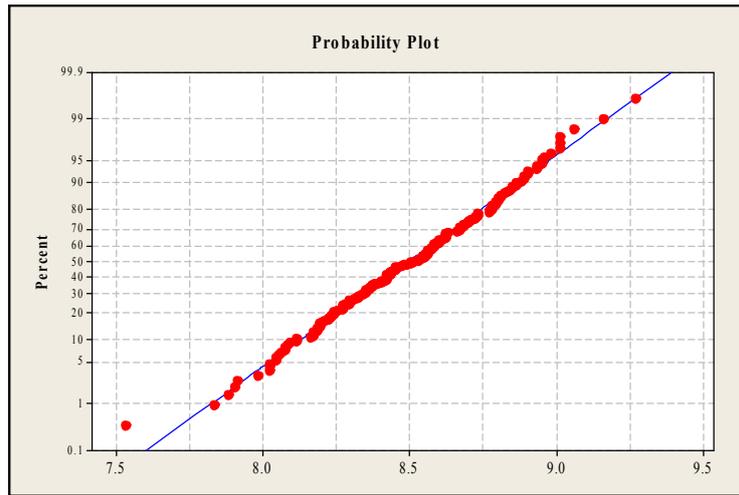


圖16 Z 軸向直徑樣本資料常態機率圖

4.2 製程能力指標計算與 MPCAC 建構

本研究中鍍線製程品質特性與製程規格如表 5 所示，分別利用樣本訊息，計算各品質特性之樣本平均數 \bar{X} 、樣本標準差 S 與各種對應的製程能力指標估計值，結果如表 6(望大品質特性)與表 7(望目品質特性)所示。附錄 3 為利用 Maple 軟體計算相關製程能力指標(金球 X 軸向直徑)範例。

表5 品質特性與製程規格

項次	品質特性	規格		目標值(T)
		規格下限(LSL)	規格上限(USL)	
1	鍍線抗拉力	2g		越大越好
2	金球抗推力	5.3g		越大越好
3	金球直徑 X	40um	52um	46um
4	金球直徑 Y	40um	52um	46um
5	金球直徑 Z	7um	10um	8.5um

表6 望大品質特性之製程能力

編號	品質特性	\bar{X}	S	\hat{C}_{pl}	\tilde{C}_{pl}	\tilde{C}_{pl} 對應之 95% 信賴下界 C_L
1	鍍線抗拉力	3.986	0.343	1.930	1.922	1.761
2	金球抗推力	19.997	1.945	2.519	2.509	2.315

表7 望目品質特性之製程能力

編號	品質特性	\bar{X}	S	\hat{C}_{pu}	\hat{C}_{pl}	\hat{C}_a	\hat{S}_{pk}	\hat{S}_{pk} 對應之 95%信賴下界
3	金球直徑 X	46.684	1.112	1.594	2.004	0.886	1.640	1.499
4	金球直徑 Y	46.732	1.105	1.589	2.031	0.878	1.635	1.495
5	金球直徑 Z	8.495	0.285	1.760	1.749	0.997	1.754	1.602

以製程能力總指標 C_T 之自然估計量 \hat{C}_T ，求得最終產品之製程能力：

$$\hat{C}_T = \frac{1}{3} \Phi^{-1} \left(\frac{1}{2} \left[1 + \prod_{i \in w} \prod_{j=1}^{n_i} (2\Phi(3\hat{C}_{pij}) - 1) \right] \right), \quad w = \{l, s\}, n_l = 2, n_s = 3,$$

將表6中2個 \hat{C}_{pl} 值與表7中3個 \hat{S}_{pk} ($=\hat{C}_{ps}$) 值代入上式計算，可得 $\hat{C}_T = 1.586$ 。

以製程總良率 P^T 的自然估計量 \hat{P}^T 計算製程總良率：

$$\hat{P}^T = \prod_{j=1}^2 \Phi(3\hat{C}_{plj}) \cdot \prod_{j=1}^3 [2\Phi(3\hat{C}_{psj}) - 1],$$

將表6中2個 \hat{C}_{pl} 值與表7中3個 \hat{S}_{pk} ($=\hat{C}_{ps}$) 值代入上式計算，可得 $\hat{P}^T = 99.99980555\%$ 。

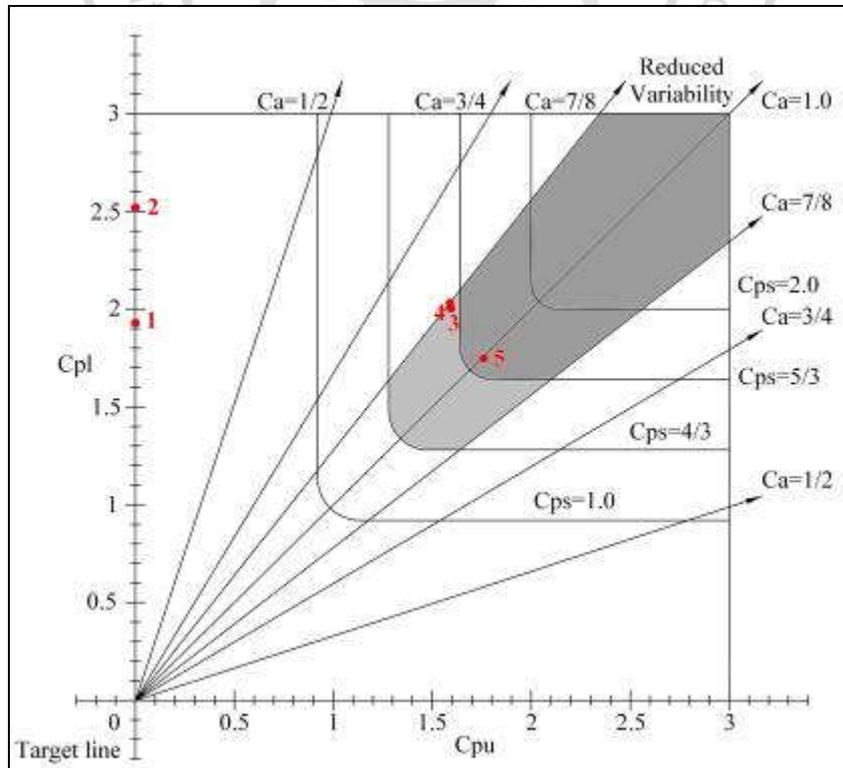


圖17 各品質特性之 MPCAC

將表 6、表 7 數據標示於 MPCAC 中，如圖 17 所示，其中深灰色區塊為 $S_{pk} \geq 1.67$ 且 $C_a \geq 0.875$ ，表示製程能力極佳(Excellent)；淡灰色區塊為 $S_{pk} \geq 1.33$ 且 $C_a \geq 0.875$ ，表示製程能力良好(Good)。

4.3 製程能力分析

根據表 6、表 7 及圖 17 等樣本資訊，我們可以對 IC 鉅線製程中 5 個關鍵品質特性分析如下：

1. 鉅線抗拉力：

由表 6 及圖 17 可知，鉅線抗拉力之 $\tilde{C}_{pl} = 1.922$ ，製程能力指標 C_{pl} 具 95%信心水準的信賴下界 $C_L = 1.761$ ，對應之不良率為 0.064 PPM，表示製程能力極佳，須保持並考慮減少樣本抽樣頻率與數目，以減少品管成本。

2. 金球抗推力：

由表 6 及圖 17 可知，金球抗推力之 $\tilde{C}_{pl} = 2.509$ ，製程能力指標 C_{pl} 具 95%信心水準的信賴下界 $C_L = 2.315$ ，對應之不良率為 1.892×10^{-6} PPM，顯示製程能力極佳，須保持並考慮減少抽樣頻率與樣本數目，以減少品管成本。

3. 金球 X 軸直徑：

由表 7 及圖 17 可知，金球 X 軸直徑之 $\hat{S}_{pk} = 1.640$ ，製程良率指標 S_{pk} 具 95%信心水準的信賴下界為 1.499，對應之不良率為 6.892 PPM，製程能力良好， $\hat{C}_a = 0.886$ ，有良好的製程精確度。

4. 金球 Y 軸直徑：

由表 7 及圖 17 可知，金球 Y 軸直徑 $\hat{S}_{pk} = 1.635$ ，製程良率指標 S_{pk} 具 95%信心水準的信賴下界為 1.495，對應之不良率為 7.291 PPM，製程能力良好， $\hat{C}_a = 0.878$ ，有足夠的製程精確度。

5. 金球 Z 軸直徑：

由表 7 及圖 17 可知，金球 Z 軸直徑之 $\hat{S}_{pk} = 1.754$ ，製程良率指標 S_{pk} 具 95%信心水準的信賴下界分別為 1.602，對應之不良率為 1.540 PPM，製程能力良好， $\hat{C}_a = 0.997$ ，有傑出的製程精確度。

6. 製程能力總指標與製程總良率：

由於製程能力總指標 $\hat{C}_T = 1.586$ 與製程總良率 $\hat{P}^T = 99.99980555\%$ 、不良率為 1.9445 PPM，顯示該 IC 鉅線製程能力非常好。即使以評估上述 5 個關鍵品質特性的指標 95%信心水準之信賴下界(參見表 6 及表 7)來計算 P^T 的估計值(註：此估計值信度不明)： $\hat{P}^T = \Phi(3 \times 1.761) \cdot \Phi(3 \times 2.315) \cdot [2\Phi(3 \times 1.499)] \cdot [2\Phi(3 \times 1.495)] \cdot [2\Phi(3 \times 1.602)] = 99.99842136\%$ ，不良率為 15.786 PPM，此 IC 鉅線製程能力仍令人滿意(Satisfactory)。

由上述分析可知 IC 鉅線製程中，5 個關鍵品質特性各別製程能力皆有良好(Good)以上程度，且不管是製程能力總指標或製程總良率都符合業界要求，目前所需執行的是減少各別製程中的變異與改善製程偏移問題，以提升產品品質並增加製程穩定度。

第五章 結論

IC 鐳線製程中 5 個關鍵品質特性中，具有 2 個望大型、3 個望目型，屬於多品質特性的製程，因此需要一個適用的製程能力評估模式，以有效且精準的執行製程績效評估。本文中以製程能力指標 C_{pl} 、 S_{pk} 來分別評估望大及望目之各別品質特性，並建構 MPCAC 以協助製程能力分析，再經由計算製程總指標 C_T 與總良率 P^T ，來評估整個製程是否合於品質要求；過程中，為了因應抽樣誤差，分別以 C_{pl} 、 S_{pk} 的信賴下界來評估各別的製程能力。本評估模式可以應用於包含望大、望小與望目的多品質特性的多重製程中，能精確且同步反應出各別的製程能力，並藉由製程總指標 C_T 與總良率 P^T ，評估整個製程的績效表現。

由於本文評估模式適用於樣本為遵循常態分配或近似常態分配，且僅對各別之品質特性建立信賴下界，然而目前大多數製程常呈現非常態分配，若能導入非常態分配的評估方式，並建立整個製程的信賴下界，則可使本評估模式更加完美。



參考文獻

1. 徐瑞富，2005，以田口方法改善金線偏移之鉸線製成問題，中原大學，碩士論文。
2. 張豐程，2003，IC 封裝製程中影響鉸線品質之參數最佳化研究，國立高雄第一科技大學，碩士論文。
3. 鍾文仁，陳佑任，2005，IC 封裝製程與 CAE 應用，全華科技圖書股份有限公司，台北。
4. Boyles, R. A., 1991, "The Taguchi Capability Index", Journal of Quality Technology, VOL. 23, pp. 17-26.
5. Boyles, R. A., 1994, "Process Capability with Asymmetric Tolerances", Communications in Statistics: Theory and Methods, VOL. 23, pp. 615-643.
6. Chen, K. S., Pearn, W. L. and Lin, P. C., 2003, "Capability Measures for Processes with Multiple Characteristics", Quality and Reliability Engineering International, VOL. 19, pp. 101-110.
7. Chou, Y. M. and Owen, D. B., 1989, "On the Distributions of the Estimated Process Capability Indices", Communications in Statistics: Theory and Methods, VOL. 18, pp. 4549-4560.
8. Huang, M. L., Chen, K. S. and Hung, Y. H., 2002, "Integrated Process Capability Analysis with an Application in Backlight Module", Microelectronics Reliability, VOL. 42, pp. 2009-2014.
9. Kane, V. E., 1986, "Process Capability Indices", Journal of Quality Technology, VOL. 18, pp. 41-52.
10. Kotz, S. and Lovelace, C. R., 1998, Process Capability Indices in Theory and Practice, London: Arnold.
11. Lee, J. C., Hung, H. N., Pearn, W. L. and Kueng, T. L., 2002, "On the Distribution of the Estimated Process Yield Index S_{pk} ", Quality and Reliability Engineering International, VOL. 18, pp. 111-116.
12. Pearn, W. L., Lin, G. H. and Chen, K. S., 1998, "Distributional and Inferential Properties of the Process Accuracy and Process Precision Indices", Communications in Statistics: Theory and Methods, VOL. 27, pp. 985-1000.
13. Pearn, W.L., Chen, K.S., 2002, "One-side Capability Indices C_{PU} and C_{PL} : Decision Making with Sample Information", International Journal of Quality & Reliability Management, VOL. 19, pp. 221-245.
14. Pearn, W.L., Lin, G.H., Wang, K.H., 2004, "Normal Approximation to the Distribution of the Estimated Yields Index S_{pk} ", Quality & Quantity, VOL. 38, pp. 95-111.

15. Pearn, W. L. and Shu, M. H., 2003, “An Algorithm for Calculating the Lower Confidence Bounds of C_{PU} and C_{PL} with Application to Low-drop-out Linear Regulators”, Microelectronics Reliability, VOL. 43, pp. 495-502.
16. Wu, C.W., 2004, “Process Capability Assessment Based on Bayesian Approach”, Ph.D Dissertation, Department of Industrial Engineering and Management, National Chiao Tung University, Taiwan.



附錄 Maple 程式

附錄1 樣本數 $n = 100$ 時， b_{n-1} 值

```
> bf := proc (f) options operator, arrow;  
2.^(1/2)*(1/(f-1))^0.5*GAMMA((1/2)*f-1/2)/GAMMA((1/2)*f-1) end  
proc;
```

$$bf := f \rightarrow \frac{2^{(1/2)} \left(\frac{1}{f-1}\right)^{0.5} \Gamma\left(\frac{1}{2}f - \frac{1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}f - 1\right)}$$

```
> evalf(bf(100));
```

0.9924018506 $\rightarrow b_{n-1}$



附錄2 試算 \hat{S}_{pk} 信賴下界(樣本數 $n = 100$ 、 $\hat{C}_{pu} = 1.50$ 、 $\hat{C}_{pl} = 2.00$)

```

> #If CPU_hat=1.50, CPL_hat=2.00;
> n:=100;

                                n := 100

> with(stats):
>
Spk_hat:=(CPU_hat,CPL_hat)->1/3*(stats[statevalf,icdf,normald]
((0.5*(stats[statevalf,cdf,normald](3*CPU_hat)+stats[statevalf
,cdf,normald](3*CPL_hat)))));

    Spk_hat := (CPU_hat, CPL_hat) →  $\frac{1}{3} \text{stats}_{statevalf, icdf, normald} \left( 0.5 (\text{stats}_{statevalf, cdf, normald} (3 \text{ CPU\_hat}) + \text{stats}_{statevalf, cdf, normald} (3 \text{ CPL\_hat})) \right)$ 

> evalf(Spk_hat(1.50,2.00));

                                1.548369049

> a_hat:=(CPU_hat, CPL_hat)->(3/2^0.5)*(CPU_hat*stats[statevalf,
pdf, normald](3*CPU_hat)+CPL_hat*stats[statevalf, pdf,
normald](3*CPL_hat));

    a_hat := (CPU_hat, CPL_hat) →  $3 (\text{CPU\_hat} \text{stats}_{statevalf, pdf, normald} (3 \text{ CPU\_hat}) + \text{CPL\_hat} \text{stats}_{statevalf, pdf, normald} (3 \text{ CPL\_hat})) / 2^{0.5}$ 

> evalf(a_hat(1.50,2.00));

                                0.00005088573057

> b_hat:=(CPU_hat, CPL_hat)->stats[statevalf, pdf,
normald](3*CPU_hat)-stats[statevalf, pdf, normald](3*CPL_hat);

    b_hat := (CPU_hat, CPL_hat) →  $\text{stats}_{statevalf, pdf, normald} (3 \text{ CPU\_hat}) - \text{stats}_{statevalf, pdf, normald} (3 \text{ CPL\_hat})$ 

> evalf(b_hat(1.50,2.00));

                                0.00001597766523

> ab:=(CPU_hat, CPL_hat)->(a_hat(CPU_hat,
CPL_hat)^2+b_hat(CPU_hat, CPL_hat)^2)^0.5;

    ab := (CPU_hat, CPL_hat) →  $(\text{a\_hat}(\text{CPU\_hat}, \text{CPL\_hat})^2 + \text{b\_hat}(\text{CPU\_hat}, \text{CPL\_hat})^2)^{0.5}$ 

> evalf(ab(1.50,2.00));

```

附錄 2 (續)

```
0.00005333519815
> M:=(CPU_hat, CPL_hat)->6*n^0.5*stats[statevalf, pdf,
normald](3*Spk_hat(CPU_hat, CPL_hat));
      M := (CPU_hat, CPL_hat) →
            6 n0.5 statsstatevalf, pdf, normald(3 Spk_hat(CPU_hat, CPL_hat))
> evalf(M(1.50, 2.00));
0.0004939362120
> #Confidence level=95%;
> stats[statevalf, icdf, normald](.950);
1.644853627
> Low:=(Spk_hat, ab, M)->Spk_hat-(ab/M)*stats[statevalf, icdf,
normald](.950);
      Low := (Spk_hat, ab, M) → Spk_hat -  $\frac{ab \text{ stats}_{statevalf, icdf, normald}(0.950)}{M}$ 
> evalf(Low(1.548369049, .5333519815e-4, .4939362120e-3));
1.370757868 →  $\hat{S}_{pk}$  信賴下界
```

附錄3 各製程能力指標計算範例(金球 X 軸徑長)

```

> #Input parameters LSL, USL, T, the sample size n, X_bar, S.
> LSL:=40; USL:=52; T:=46; n:=180; X_bar:=46.684;
S:=1.112;d:=(USL-LSL)/2;

                                LSL := 40

                                USL := 52

                                T := 46

                                n := 180

                                X_bar := 46.684

                                S := 1.112
                                d := 6

> CPL_hat:=(X_bar-LSL)/(3*S);
                                CPL_hat := 2.003597122 →  $\hat{C}_{pl}$ 
> CPU_hat:=(USL-X_bar)/(3*S);
                                CPU_hat := 1.593525180 →  $\hat{C}_{pu}$ 
> Ca_hat:=1-(abs(X_bar-T)/d);
                                Ca_hat := 0.8860000000 →  $\hat{C}_a$ 

> with(stats):
>
Spk_hat:=(CPU_hat,CPL_hat)->1/3*(stats[statevalf,icdf,normald]
((0.5*(stats[statevalf,cdf,normald](3*CPU_hat)+stats[statevalf
,cdf,normald](3*CPL_hat)))));

Spk_hat := (CPU_hat, CPL_hat) →  $\frac{1}{3} stats_{statevalf, icdf, normald} ($ 
0.5 (statsstatevalf, cdf, normald(3 CPU_hat) + statsstatevalf, cdf, normald(3 CPL_hat)))
> evalf(Spk_hat(1.594,2.004));
                                1.639732315 →  $\hat{S}_{pk}$ 

> a_hat:=(CPU_hat, CPL_hat)->(3/2^0.5)*(CPU_hat*stats[statevalf,
pdf, normald](3*CPU_hat)+CPL_hat*stats[statevalf, pdf,
normald](3*CPL_hat));

```

附錄 3 (續)

```

a_hat := (CPU_hat, CPL_hat) → 3 (CPU_hat statsstatevalf, pdf, normald(3 CPU_hat)
+ CPL_hat statsstatevalf, pdf, normald(3 CPL_hat)) / 20.5
> evalf(a_hat(1.594, 2.004));
0.00001462511043
> b_hat := (CPU_hat, CPL_hat) → stats[statevalf, pdf,
normald](3*CPU_hat) - stats[statevalf, pdf, normald](3*CPL_hat);
b_hat := (CPU_hat, CPL_hat) →
statsstatevalf, pdf, normald(3 CPU_hat) - statsstatevalf, pdf, normald(3 CPL_hat)
> evalf(b_hat(1.594, 2.004));
0.4312423008 10-5
> ab := (CPU_hat, CPL_hat) → (a_hat(CPU_hat,
CPL_hat)^2 + b_hat(CPU_hat, CPL_hat)^2)^0.5;
ab := (CPU_hat, CPL_hat) →
(a_hat(CPU_hat, CPL_hat)^2 + b_hat(CPU_hat, CPL_hat)^2)0.5
> evalf(ab(1.594, 2.004));
0.00001524765055
> M := (CPU_hat, CPL_hat) → 6*n^0.5*stats[statevalf, pdf,
normald](3*Spk_hat(CPU_hat, CPL_hat));
M := (CPU_hat, CPL_hat) →
6 n0.5 statsstatevalf, pdf, normald(3 Spk_hat(CPU_hat, CPL_hat))
> evalf(M(1.594, 2.004));
0.0001786735910
> #Confidence level=95%;
> stats[statevalf, icdf, normald](.95);
1.644853627
> Low := (Spk_hat, ab, M) → Spk_hat - (ab/M)*stats[statevalf, icdf,
normald](.95);
Low := (Spk_hat, ab, M) → Spk_hat -  $\frac{ab \text{ stats}_{statevalf, icdf, normald}(0.95)}{M}$ 
> evalf(Low(1.639732315, .1524765055e-4, .1786735910e-3));
1.499363763 →  $\hat{S}_{pk}$  信賴下界

```

附表

附表1 信賴下界 C_U (擷取自 Pearn and Shu, 2003)

n	\tilde{C}_{pu}												
	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
150	1.449	1.541	1.634	1.727	1.819	1.912	2.006	2.099	2.172	2.285	2.379	2.472	2.566
155	1.451	1.543	1.636	1.729	1.822	1.916	2.009	2.102	2.175	2.290	2.384	2.477	2.571
160	1.453	1.546	1.639	1.732	1.825	1.918	2.012	2.106	2.179	2.294	2.388	2.482	2.576
165	1.456	1.548	1.641	1.734	1.827	1.921	2.015	2.109	2.182	2.297	2.392	2.486	2.581
170	1.458	1.550	1.643	1.737	1.830	1.924	2.018	2.112	2.185	2.300	2.395	2.490	2.585
175	1.460	1.552	1.645	1.739	1.832	1.926	2.020	2.114	2.188	2.304	2.399	2.493	2.589
180	1.462	1.554	1.648	1.741	1.834	1.928	2.023	2.117	2.191	2.306	2.402	2.497	2.592
185	1.464	1.556	1.650	1.743	1.837	1.931	2.025	2.119	2.194	2.309	2.405	2.500	2.596
190	1.465	1.558	1.652	1.745	1.839	1.933	2.027	2.122	2.196	2.312	2.407	2.503	2.599
195	1.467	1.560	1.653	1.747	1.841	1.935	2.029	2.124	2.198	2.314	2.410	2.505	2.602
200	1.469	1.562	1.655	1.749	1.843	1.937	2.031	2.126	2.200	2.316	2.412	2.508	2.604

附表2 鐳線抗拉力樣本資料($LSL = 2g$)

	1	2	3	4	5	6
S1	3.44	3.95	3.89	4.70	3.77	4.45
S2	3.96	4.09	3.77	4.42	4.18	4.32
S3	4.03	3.71	3.29	4.01	4.14	3.32
S4	3.35	4.02	3.60	4.36	4.31	3.35
S5	3.36	3.99	4.00	4.38	3.71	3.44
S6	4.51	3.86	3.53	3.72	3.60	4.14
S7	3.53	3.93	3.67	3.43	3.94	4.62
S8	4.68	3.47	4.40	3.55	4.18	4.42
S9	3.06	4.25	3.34	4.74	4.08	4.11
S10	4.61	4.10	3.22	4.14	4.03	3.69
S11	3.77	3.76	4.12	4.57	3.72	4.05
S12	3.91	3.79	4.30	4.23	3.42	3.92
S13	4.08	3.92	3.86	3.24	3.92	3.52
S14	3.89	4.32	4.00	4.48	4.27	4.13
S15	4.40	3.53	3.86	3.96	4.08	4.34
S16	3.99	3.98	3.88	3.99	3.53	3.66
S17	4.57	3.85	4.36	4.28	3.86	3.97
S18	3.83	3.78	4.32	3.42	3.51	3.78
S19	3.95	4.21	4.75	3.57	3.92	3.99
S20	3.88	4.16	4.22	4.48	3.63	3.68
S21	3.40	4.87	4.24	4.06	3.81	4.27
S22	3.77	4.07	3.89	4.35	4.25	3.72
S23	4.26	4.24	3.86	3.95	3.80	4.65
S24	4.11	3.88	4.40	3.89	3.81	4.56
S25	4.23	4.17	4.20	4.39	4.43	4.20
S26	3.47	3.51	3.84	3.93	4.17	4.10
S27	3.76	4.49	3.80	4.08	4.30	4.33
S28	3.86	4.07	4.28	3.90	4.22	3.84
S29	4.00	4.47	3.94	3.43	3.69	3.84
S30	3.54	4.55	4.16	4.02	3.86	4.03

附表3 金球抗推力樣本資料($LSL = 5.3g$)

	1	2	3	4	5	6
S1	19.74	19.66	21.75	20.19	20.09	17.74
S2	21.79	21.92	18.70	18.59	17.81	20.33
S3	22.80	21.01	21.65	19.24	18.58	17.41
S4	18.97	18.28	19.10	21.32	20.99	22.77
S5	21.99	15.59	21.28	18.14	19.62	19.85
S6	18.43	24.81	15.81	17.92	20.51	24.57
S7	19.68	21.99	17.42	19.71	19.53	20.18
S8	19.22	20.07	23.69	14.66	19.49	20.57
S9	18.23	16.88	21.03	19.49	20.05	19.15
S10	18.37	22.14	22.15	21.43	17.71	19.41
S11	19.14	20.09	21.24	17.79	19.51	20.74
S12	23.02	20.91	19.09	20.35	20.19	20.18
S13	19.22	20.15	23.49	21.93	16.19	20.46
S14	20.67	17.78	17.27	19.49	21.60	21.83
S15	21.32	19.35	21.02	19.28	17.95	21.88
S16	20.46	17.34	19.31	20.10	23.04	19.83
S17	20.91	19.27	18.31	16.73	20.44	16.63
S18	20.21	19.05	21.43	20.12	21.84	21.13
S19	18.92	20.98	21.71	20.30	20.82	19.95
S20	22.00	20.08	18.81	20.34	13.99	22.41
S21	21.14	21.01	23.48	19.60	22.25	18.77
S22	18.19	18.83	21.50	17.99	22.38	19.91
S23	19.00	21.83	19.62	20.90	16.07	21.12
S24	22.15	19.78	19.57	20.81	20.25	24.41
S25	19.48	18.08	17.64	20.88	18.58	17.05
S26	19.67	17.43	18.03	20.59	21.34	19.16
S27	21.01	20.27	21.28	21.25	16.89	20.31
S28	20.09	19.93	19.37	19.36	21.34	23.61
S29	21.86	20.57	20.62	20.91	20.66	16.41
S30	22.74	21.75	22.19	20.45	18.74	18.48

附表4 金球 X 軸徑尺寸樣本資料(LSL, T, USL) = (40, 46, 52)

	1	2	3	4	5	6
S1	48.35	48.07	49.99	46.42	46.16	48.11
S2	48.51	47.41	45.86	47.91	46.08	44.73
S3	44.69	47.14	47.82	45.88	45.01	45.43
S4	48.55	45.92	46.81	46.00	48.01	47.41
S5	47.24	47.39	46.03	46.08	45.37	47.33
S6	46.18	46.65	46.26	47.91	46.79	47.31
S7	47.45	45.46	47.51	46.51	46.97	47.33
S8	45.61	45.24	47.96	46.48	47.40	48.73
S9	46.60	47.72	47.61	48.17	46.07	46.32
S10	46.97	47.42	47.39	48.73	46.43	47.48
S11	47.24	47.55	45.27	46.42	46.91	46.15
S12	45.08	47.41	45.10	46.93	47.04	44.47
S13	46.04	47.07	45.68	48.49	46.65	48.32
S14	47.44	45.73	45.70	45.31	45.78	47.73
S15	46.37	47.50	46.14	47.57	48.80	46.75
S16	45.83	46.10	46.55	46.95	46.42	46.36
S17	45.71	46.80	48.40	47.52	45.93	47.90
S18	47.54	47.46	47.01	47.88	46.77	45.31
S19	46.74	46.52	45.03	44.48	47.59	46.68
S20	47.77	45.71	45.51	45.87	46.51	45.99
S21	45.62	48.47	47.40	47.28	45.61	47.44
S22	46.38	46.45	43.82	45.34	47.80	45.94
S23	47.21	45.84	46.60	44.34	46.72	46.54
S24	47.02	45.06	46.69	47.43	49.20	46.76
S25	46.09	46.92	45.48	47.41	46.67	46.95
S26	46.43	45.24	49.52	46.65	47.64	46.96
S27	46.99	43.87	45.94	44.33	45.02	48.95
S28	45.55	47.00	47.18	45.27	47.52	45.99
S29	45.63	47.34	44.90	45.51	47.82	46.13
S30	47.59	47.01	46.34	45.86	46.88	47.66

附表5 金球 Y 軸徑尺寸樣本資料(LSL, T, USL) = (40, 46, 52)

	1	2	3	4	5	6
S1	47.06	45.49	47.05	49.26	46.04	47.45
S2	44.81	46.54	45.78	47.90	47.56	48.84
S3	45.92	45.43	47.24	45.06	47.67	46.52
S4	46.76	46.14	44.32	45.26	46.71	47.65
S5	46.36	46.51	44.76	46.49	47.95	47.38
S6	47.18	47.03	46.51	45.66	47.50	44.92
S7	46.49	47.14	46.64	43.95	47.02	46.95
S8	45.60	49.09	47.99	47.75	45.82	45.29
S9	48.02	46.39	46.27	46.41	46.45	45.60
S10	45.45	47.25	46.52	46.74	46.92	47.66
S11	44.58	47.72	47.69	44.92	45.85	46.57
S12	46.17	46.94	48.44	46.58	47.09	46.44
S13	47.91	45.93	46.39	47.55	47.06	44.44
S14	48.61	48.23	45.92	48.92	46.96	46.12
S15	46.56	46.53	49.49	46.67	47.83	46.22
S16	45.18	46.54	48.46	46.61	46.15	46.90
S17	46.52	45.99	47.30	45.70	47.87	45.57
S18	47.11	46.42	48.66	48.45	46.48	47.81
S19	46.85	47.22	46.66	46.04	47.28	43.90
S20	44.40	47.42	47.75	45.20	46.39	47.80
S21	45.61	47.30	46.30	47.31	48.30	46.87
S22	49.44	48.32	46.59	48.92	46.67	47.09
S23	45.31	47.81	46.96	48.21	44.90	47.71
S24	45.81	46.12	44.64	46.75	47.53	45.44
S25	46.29	45.89	45.39	45.95	47.16	45.03
S26	47.28	47.06	48.42	46.47	46.23	47.16
S27	47.63	46.53	46.46	47.09	47.21	47.18
S28	46.67	46.28	47.07	48.17	45.86	48.40
S29	46.48	47.52	47.05	49.21	46.78	44.99
S30	46.60	45.83	46.09	46.72	46.27	46.35

附表6 金球 Z 軸徑尺寸樣本資料(LSL, T, USL) = (7, 8.5, 10)

	1	2	3	4	5	6
S1	8.27	8.78	8.09	8.79	8.80	8.69
S2	8.81	8.02	8.31	8.62	8.46	8.50
S3	8.98	8.58	8.40	8.50	8.35	9.01
S4	8.62	8.62	8.68	8.23	8.68	8.77
S5	8.60	8.77	8.38	8.19	8.40	8.57
S6	8.78	8.67	8.49	8.89	8.37	8.39
S7	8.36	8.35	8.53	8.73	8.42	8.34
S8	8.62	8.73	8.43	8.43	8.27	8.17
S9	8.85	8.04	8.61	8.21	8.42	8.11
S10	8.27	8.28	8.20	8.71	8.42	8.85
S11	8.08	8.67	8.35	8.66	7.88	8.57
S12	8.60	8.79	8.24	7.53	7.91	8.37
S13	8.93	8.53	8.95	9.27	8.07	8.72
S14	8.42	8.19	8.59	8.72	8.82	8.56
S15	8.62	7.98	8.54	8.11	9.06	8.83
S16	8.33	8.18	9.01	8.27	8.84	8.58
S17	8.79	8.24	8.37	8.42	8.67	8.73
S18	8.43	8.55	8.16	8.56	8.24	8.07
S19	8.81	8.96	8.71	8.55	8.54	8.45
S20	8.80	8.44	8.35	8.22	8.58	7.90
S21	8.02	9.16	8.78	8.29	8.18	8.86
S22	8.56	8.31	8.70	8.32	8.48	8.80
S23	8.04	8.23	8.29	8.43	8.25	8.88
S24	8.53	8.67	8.22	8.93	8.86	8.63
S25	8.58	8.56	8.45	8.32	8.57	7.83
S26	8.62	8.78	8.51	8.68	8.42	8.34
S27	8.05	8.29	9.01	8.60	8.06	8.41
S28	8.47	8.90	8.95	8.70	8.29	8.45
S29	8.02	8.56	8.17	8.17	8.19	8.90
S30	8.55	8.89	8.36	8.45	8.60	8.19