

國立勤益科技大學
工業工程與管理研究所碩士在職專班
碩士學位論文

應用六標準差品質改善流程提升
精密機械齒輪產品品質

指導教授：陳坤盛 博士

研究生：陳群岳

學 號：B9915009

中華民國一〇一年六月十日

應用六標準差品質改善流程提升

精密機械齒輪產品品質

**The application of six-sigma method to improve quality of
Precision gear**

研究生：陳群岳

指導教授：陳坤盛 教授

國立勤益科技大學

工業工程與管理系碩士在職專班

碩士論文

A Thesis

Submitted to

Institute of Institute Engineering & Management

National Chin-Yi University of Technology

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

June 2012

Taiping, Taichung, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年六月

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 工業工程與管理研究所 碩士在職專班 陳群岳 君

所提論文 應用六標準差品質改善流程提升精密機械

齒輪產品品質

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

口試委員： _____

陳群岳

王詩欣

陳坤盛

指導教授： 陳坤盛

系(所)主任： _____

工業工程與管理系
主任 陳水浪

中華民國 101 年 5 月

應用六標準差品質改善流程提升 精密機械齒輪產品品質

研究生：陳群岳

指導教授：陳坤盛博士

國立勤益科技大學 工業工程與管理系碩士在職專班

中文摘要

精密機械工具機為製造各類機械的加工設備，故稱為「機械之母」，其為各種基礎加工與精密加工的必備機械，在整個機械工業中居關鍵性地位。台灣齒輪機產業初期是以複製先進國家生產的機械，以生產低精密度、耐用性低的傳統工具機，而於 1990 年後，才開始製造高效率、高精度、複合化的工具機。因此，本研究將針對精密機械齒輪產品探討其製造流程，整理出重要的品質特性製程，並發展 $\bar{\delta}-R$ 管制圖，以確定製程為穩定製程(in-control)。接著本研究考慮量測誤差，利用量測誤差概念提出製程能力 AC_{pmk} 指標，並發展一套考慮量測系統誤差下的評估模式，找出影響精密機械齒輪產品品質不佳之重要品質特性製程，接著應用六標準差之 MAIC 品質改善流程，分析造成品質不佳的原因，同時運用田口實驗設計探討最佳的製程參數，並以管制圖監控其製程品質，希望藉由六標準差之 MAIC 流程持續改善精密機械齒輪的製程品質，以協助業者提升精密機械齒輪產品品質與競爭力。

關鍵字：精密機械齒輪、六標準差、製程能力指標、量測誤差

The application of six-sigma method to improve quality of Precision gear

Student: C. Y. Chen

Advisors: Dr. K. S. Chen

Department of Industrial Engineering & Management
National Chin-Yi University of Technology

英文摘要

Precision machine tool is the equipment needed to manufacture all kinds of machine. It is known as the “mother of machinery,” and is the key point in machinery industry. In the early stage, Taiwan first manufacture traditional machine tools which could produce goods with low precision and durability by copy ones manufactured by advanced countries. Until to 1990, it started to manufactured efficient, precise, and compound machine tool. Thus, this study aims at manufacturing process of precision gear, finding out crucial quality characteristics in the process, and developing control chart to ensure the process being in-control. Furthermore, we developed a evaluation model considering the process capability index of measurement errors and attain the factors that affect manufacturing process by applying MAIC procedures of six-sigma method. We also using Taguchi method to obtain the optimization of process and monitoring the process quality by control chart. This study could be a reference for manufacturers to enhance the quality of precision gears and competitiveness by applying MAIC procedures of six-sigma method to improving the process quality continually.

Keywords: precision gear, six-sigma method, process capability index, measurement errors

誌謝

本論文能夠順利完成，首先要感謝恩師 陳坤盛博士於百忙中的諄諄教誨與指導，並在學習過程中對其觀念的釐清，使我不僅在課業上有所收穫，更在處世為人及分析事理方面穩健成熟，群岳何其榮幸能跟隨您學習，師恩浩蕩，特此致上最誠摯的謝意！另外，論文口試期間感謝陳貴琳博士與王靖欣博士，對論文所提供的寶貴意見及指正，使論文更臻完備，衷心感謝。

二年研究所求學過程中，感謝傳道、授業、解惑的諸位老師：陳教授水凜、康教授鶴耀、張教授嘉寶、黃教授喬次、劉教授自強、張教授倫及黃教授存宏，同時也要感謝同窗好友的互相關懷與協助，在這些日子以來，點點滴滴在心裡，留下許多美好的回憶，深深懷念這份情誼。

能夠進修碩士學位完全仰賴公司老闆的有心栽培與厚愛，以及同事們對工作上的協助，群岳才能有這二年進修的機會，沒有你們的支持、鼓勵與栽培，就無法成就今天的我。

最後，僅將本論文獻給最敬愛、最辛苦的父母親以及二位弟弟厚任、韻仁在精神上給予的支持與鼓勵，使我在無後顧之憂的情況下順利完成學業，由衷的感謝你們，並將此榮耀與你們分享。

陳群岳 謹誌 于勤益
中華民國一〇一年六月

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	v
表目錄	vi
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的與方法	3
1.3 研究架構	4
第二章 $\bar{\delta}-R_{\gamma}$ 管制圖評估模式	5
第三章 考慮量測系統誤差之製程品質衡量模式	9
3.1 考慮量測系統誤差下之製程評估指標	9
3.2 精密機械齒輪製程之品質衡量模式	12
第四章 六標準差之 MAIC 品質改善流程	15
4.1 衡量與分析	15
4.2 改善與控制	20
第五章 結論	23
參考文獻	24

圖目錄

圖 1：精密機械齒輪加工流程圖	2
圖 2：品質改善流程	4
圖 3：硬度製程之 $\bar{\delta}$ 管制圖	7
圖 4：硬度製程之 R 管制圖	7
圖 5：多品質特性之製程能力分析圖(MPCAC/ AC_{pmk})	18
圖 6：硬度精確度不足之特性要因圖	19
圖 7：最佳參數設定圖	22



表目錄

表 1：精密機械齒輪重要品質特性規格表	3
表 2：管制圖之參數資料表	6
表 3：各種 C_T 值(V)所對應之 AC_{pmk} 值(W)及其良率對照表	14
表 4：精密機械齒輪之產品與個別重要品質特性製程能力之品質水準表	17
表 5：重要品質特性製程參數資料表	19
表 6：控制因子水準表	20
表 7： $L_9(3^3)$ 直交表實驗結果	21



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

精密機械工具機為製造各類機械的加工設備，故稱為「機械之母」，其為各種基礎加工與精密加工的必備機械，在整個機械工業中居關鍵性地位，而零組件則是機械工業之「本」，由此可知零組件在機械工業上扮演著舉足輕重之角色，亦不斷協助機械產業發展與進步。近代之機械工業，影響機械產品發展最具關鍵之零組件如電腦數值控制器、線性滑軌、線性馬達、滾珠螺桿等都是最近十餘年來最新開發之關鍵零組件產品。其中特別是具關鍵性之零組件產品，例如機械運動中最主要之線性運動零組件，包括滾珠螺桿、線性滑軌、線性馬達等。而機械旋轉運動中則最重要是旋轉用零組件，例如軸承、齒輪等，亦均是現代化與自動化機械不可或缺的關鍵零組件。

現今之齒輪已被廣泛使用於工具機、產業機械、汽車、機車、飛機、輪船、高速鐵路機車等，可說是一切之旋轉運動、變速及轉向等均廣泛使用齒輪產品。齒輪業除了專注於前述的中大生產型態之外，電梯減速機、精密小型減速機、精密分度的旋轉工作台、伺服變速器，代步車的高減速比齒輪箱、沙灘車傳動系統以及手自排變速箱等，這些產品將引領齒輪產業邁向精密機械齒輪製造的新製程品質。因此，精密機械齒輪隨著產品之複雜度或精密度的提升，任何一台機械其中之精密機械齒輪組件出了問題，均會影響到機械品質與功能。

精密機械齒輪是指模數 1.0 以下齒輪，此類齒輪大部份材料僅有調質，較少硬化，但是驅動的精確機械齒輪軸齒數少，對噪音又特別講究，所以精密機械齒輪的製程品質要求很高，因此面對精密機械齒輪需求量大增及品質的嚴苛要求下，提升其產品品質才能維持一定的競爭力。而精密機械齒輪在製作過程皆重要且關鍵，共需經過調質及內徑研磨等製程(如圖 1 所示)，生產的過程中若發生瑕疵，則多數製程的在製品都無法重工，且品質不佳的精確機械齒輪將產生較大的噪音，甚至影響整體組件或產品的功能，因此每段製程的品質都非常的重要；其中在材質硬度、齒輪栓槽

寬及齒輪栓槽深等製程中，如果品質發生差異，則會造成產品功能上發生問題，因而導致成本的浪費，因此這三段製程是本研究所探討的重點。

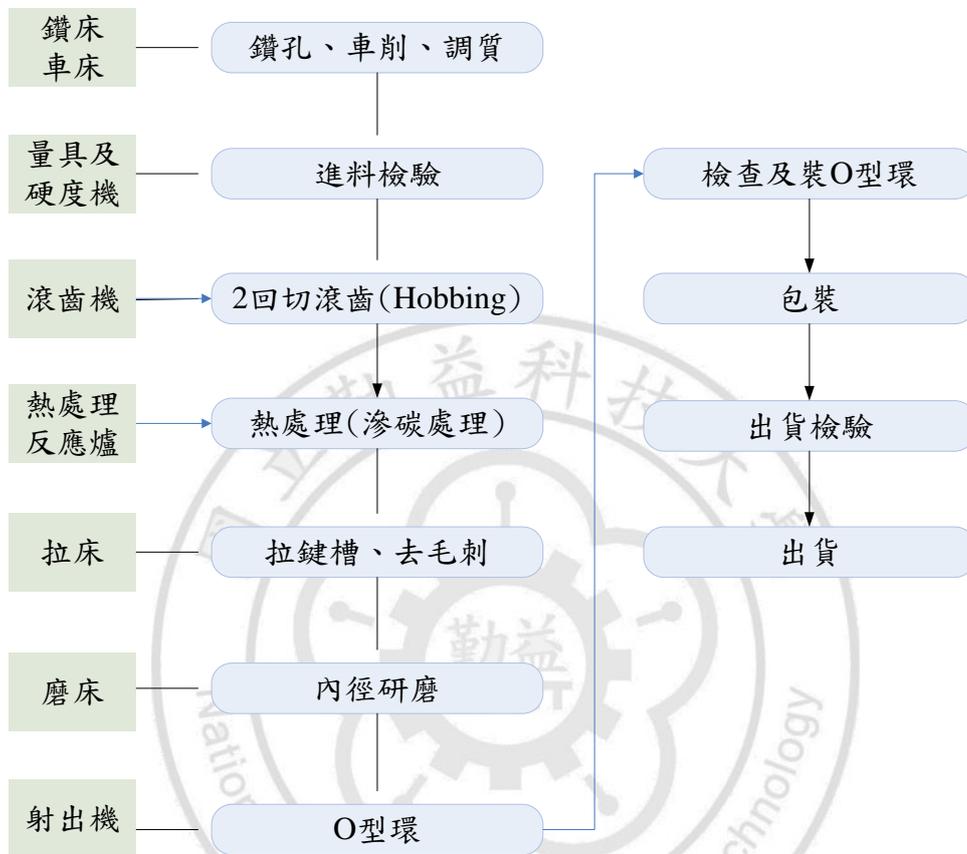


圖 1：精密機械齒輪加工流程圖

如前所述，由於材質硬度、齒輪栓槽寬及齒輪栓槽深等三段製程是影響精密機械齒輪製程品質的關鍵製程，且品質特性規格皆屬於對稱且望目，我們將其規格表整理如表 1 所示。根據 Kane (1986)指出，製程能力指標 (Process capability indices; PCI)是綜合了製程良率(Process yield)與製程期望損失 (Process expect loss)評估方法的優點所提出的製程品質衡量指標，當製程能力指標值愈大時，則製程良率愈高，也可保證愈小的製程損失，而 Wang et al. (2011)的研究亦指出，許多的精密機械製造業、自動化製造業、半導體製造或封裝廠，都以製程能力指標來衡量製程能力與績效是否達到品質的要求。因此，本研究將以製程能力指標與製程良率的概念發展評估模式，以衡量精密機械齒輪的製程品質。

表 1：精密機械齒輪重要品質特性規格表

重要品質特性製程	規格屬性	單位	規格
槽寬製程	望目型	mm	6.009±0.018
槽深製程	望目型	mm	21.85±0.05
硬度製程	望目型	HR	20±2

1.2 研究目的與方法

根據 Chen et al. (2009)指出，以製造業實際進行製程品質改善時，須於統計穩定的製程中(in-control)進行樣本抽樣與分析。因此，在進行精密機械齒輪產品品質提升時，首先本研究將定義準確度指標(δ)與精確度指標(γ)，發展($\bar{\delta} - R_\gamma$)管制圖來確定精密機械齒輪製程是否屬於穩定製程，Chen et al. (2006)亦指出須於統計穩定的製程中(in-control)進行樣本抽樣與分析才具有意義。

接著，在選擇製程能力指標時，本研究將針對目前 Juran (1974), Kane (1986), Chan et al. (1988)與 Pearn et al. (1992)等學者所提出應用率較高的製程能力指標，包含 C_p 、 C_{pk} 、 C_{pm} 與 C_{pmk} 等指標。其中以 Pearn et al. (1992)提出的 C_{pmk} 指標對於製程平均數是否偏離目標值的反應相較於 C_p 、 C_{pk} 與 C_{pm} 指標更為敏感且能反應製程的實際狀況，因此本研究將參考 Chen et al. (2006)的概念，針對表 1 中的 3 個望目型重要品質特性製程，以 Pearn et al.(1992)所定義與製程良率有一對一數學關係的 C_{pmk} 評估指標，並參考 Chen et al. (2008)的概念考慮量測誤差發展一個可以評估精密機械齒輪產品之多品質特性評估模式與多品質特性製程能力分析圖，找出影響精密機械齒輪產品品質不佳之重要品質特性製程，同時分析造成品質不佳的原因，再以田口實驗設計探討最佳的製程水準，並以管制圖監控其製程品質，希望藉由本研究發展之製程評估與改善流程，持續改善精密機械齒輪的製程品質，協助業者提升精密機械齒輪產品品質，其品質改善流程圖，如圖 2 所示。

1.3 研究架構

本論文之架構，在內容上共分為五章來討論。第一章為緒論，說明研究背景與動機、研究目的及對本文之架構做一說明。第二章發展 $(\bar{\delta}-R_y)$ 管制圖來確定精密機械齒輪製程是否屬於穩定製程。第三章以製程能力指標 C_{pmk} 與製程良率為基礎，發展考慮量測系統誤差下之製程評估指標。第四章應用Ham et al. (2002) 所提出的六標準差 MAIC 模式，透過 MAIC 的改善流程來提昇精密機械齒輪產品的製程品質。第五章為結論，對本研究做一總結。

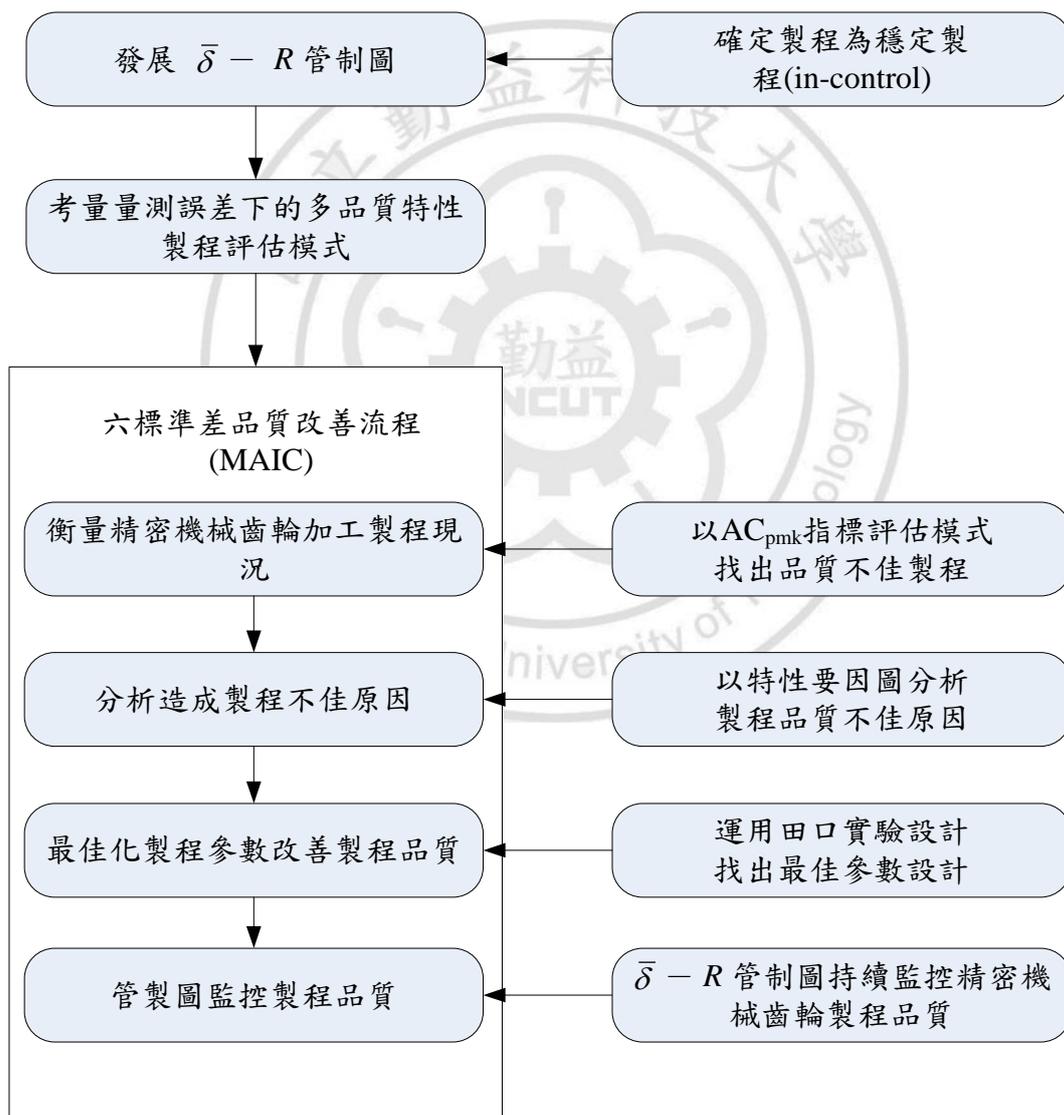


圖 2：品質改善流程

第二章 $\bar{\delta}-R_\gamma$ 管制圖評估模式

根據 Chen et al. (2006)指出，通常製造業實際進行製程品質改善時，須於統計穩定的製程中(in-control)進行樣本抽樣與分析才具意義。因此，在進行精密機械齒輪產品品質提升時，本研究首先發展 $(\bar{\delta}-R_\gamma)$ 管制圖來確定精密機械齒輪製程是否屬於穩定製程。因此，製程準確度指標 (δ) 與製程精確度指標 (γ) 定義如下所示：

$$\delta_i = \frac{\mu_i - T_i}{d_i} \quad (1)$$

$$\gamma_i = \left(\frac{\sigma_i}{d_i} \right) \quad (2)$$

其中 $i = 1, \dots, 3$ ，代表品質特性。當 $\mu_i < T_i$ 、 $\mu_i = T_i$ 或 $\mu_i > T_i$ 時，則 $\delta_i < 0$ 、 $\delta_i = 0$ 或 $\delta_i > 0$ ；此外，若 $\mu_i = LSL$ 或 $\mu_i = USL$ 時，則 $\delta_i = -1$ 或 $\delta_i = 1$ 。根據 Montgomery (2004) 指出，由於現在計算器發達，所以通常連續型樣本數可以取大一點，本研究參考此概念並配合 $\bar{X}-R$ 品質管制圖，在製程中每隔一段時間抽取 1 組樣本，每組樣本有 n 個觀察值，共抽取 m 組樣本，以 \bar{X}_j 和 S_j^2 分別表示第 j 組樣本的平均數與變異數，則 m 組樣本的平均數與樣本變異數的平均數分別為 $\bar{\bar{X}} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij} / mn$ ， $\bar{S}_i = \sqrt{\sum_{i=1}^m S_i / m}$ ；接著以 $\hat{\delta}_i$ 和 $\hat{\gamma}_i$ 分別表示第 i 組樣本的準確度與精確度指標，可計算出 m 組樣本準確度指標的平均數與樣本精確度指標的平均數分別為 $\bar{\delta}_i = (\bar{\bar{X}} - T) / d$ ， $\bar{\gamma}_i = \bar{S}_i / d$ 。

事實上，因為 $\hat{\delta}_i = (\bar{X}_i - T_i) / d_i$ 、 $\hat{\gamma}_i = S_i / d_i$ ，因此本研究將參考 $\bar{X}-R$ 管制圖可以推導出 $\bar{\delta}-R_\gamma$ 管制圖的管制上、下限，以確定精密機械齒輪製程是否屬於穩定的製程。

$$UCL_{\bar{\delta}} = \hat{\mu}_{\bar{\delta}} + 3\hat{\sigma}_{\bar{\delta}} = \hat{\mu}_{\bar{\delta}} + 3\frac{\hat{\sigma}_{\bar{\gamma}}}{\sqrt{n}} = \bar{\delta} + 3\frac{\bar{R}_\gamma}{d_2\sqrt{n}} = \bar{\delta} + D_r\bar{R}_\gamma \quad (3.a)$$

$$CL_{\bar{\delta}} = \hat{\mu}_{\bar{\delta}} = \bar{\delta} \quad (3.b)$$

$$LCL_{\bar{\delta}} = \hat{\mu}_{\bar{\delta}} - 3\hat{\sigma}_{\bar{\delta}} = \hat{\mu}_{\bar{\delta}} - 3\frac{\hat{\sigma}_{\bar{\gamma}}}{\sqrt{n}} = \bar{\delta} - 3\frac{\bar{R}_{\gamma}}{d_2\sqrt{n}} = \bar{\delta} - D_r\bar{R}_{\gamma} \quad (3.c)$$

$$UCL_{R_{\gamma}} = \hat{\mu}_{R_{\gamma}} + 3\hat{\sigma}_{R_{\gamma}} = d_2\hat{\sigma}_{\gamma} + 3d_3\hat{\sigma}_{\gamma} = \bar{R}_{\gamma} + 3d_3\frac{\bar{R}_{\gamma}}{d_2} = \bar{R}_{\gamma}\left(1 + 3\frac{d_3}{d_2}\right) = D_4\bar{R}_{\gamma} \quad (4.a)$$

$$CL_{R_{\gamma}} = \hat{\mu}_{R_{\gamma}} = d_2 \times \frac{\bar{R}_{\gamma}}{d_2} = \bar{R}_{\gamma} \quad (4.b)$$

$$LCL_{R_{\gamma}} = \hat{\mu}_{R_{\gamma}} - 3\hat{\sigma}_{R_{\gamma}} = d_2\hat{\sigma}_{\gamma} - 3d_3\hat{\sigma}_{\gamma} = \bar{R}_{\gamma} - 3d_3\frac{\bar{R}_{\gamma}}{d_2} = \bar{R}_{\gamma}\left(1 - 3\frac{d_3}{d_2}\right) = D_3\bar{R}_{\gamma} \quad (4.c)$$

其中 $D_r = 3/d_2\sqrt{n}$ 、 $D_3 = 1 - (3d_3/d_2)$ 、 $D_4 = 1 + (3d_3/d_2)$ ，本研究建立 $n = 3(1)12$ 所對應的管制圖參數資料表，如表 2 所示，舉例而言，抽取樣本數為 10，則 $D_r = 0.3082$ 、 $D_3 = -0.4519$ 、 $D_4 = 1.1017$ ，如此就可得到管制上下限以確定精密機械齒輪製程是否屬於穩定的製程。

表 2：管制圖之參數資料表

樣本數 (n)	D_r	D_3	D_4	d_2	d_3
3	1.0231	-0.9829	2.1642	1.693	0.888
4	0.7285	-0.7965	1.7678	2.059	0.880
5	0.6000	-0.7120	1.6064	2.326	0.864
6	0.4833	-0.6093	1.3986	2.534	0.848
7	0.4193	-0.5544	1.2940	2.704	0.833
8	0.3726	-0.5128	1.2153	2.847	0.820
9	0.3367	-0.4795	1.1529	2.970	0.808
10	0.3082	-0.4519	1.1017	3.078	0.797
11	0.2851	-0.4289	1.0592	3.173	0.787
12	0.2636	-0.4061	1.0149	3.285	0.778

* $D_r = 3/d_2\sqrt{n}$ ， $D_3 = 1 - (3d_3/d_2)$ ， $D_4 = 1 + (3d_3/d_2)$

如前所述，我們於精密機械齒輪製程中，每隔一段時間實際抽取硬度製程 1 組樣本，每組樣本有 10 個觀察值，共抽取 20 組樣本，接著計算 $\hat{\delta}_i$ 、 $\hat{\gamma}_i$ 、 $\bar{\delta}$ 與 $\bar{\gamma}$ 等參數，並由表 3 查表得 $D_r = 0.3082$ 、 $D_3 = -0.4519$ 與 $D_4 = 1.1017$ ，透過公式(3.a)至(4.c)可以計算 $\bar{\delta} - R_{\gamma}$ 管制圖之上下限，並將抽取的樣本繪入圖 3 與圖 4 的管制圖中。

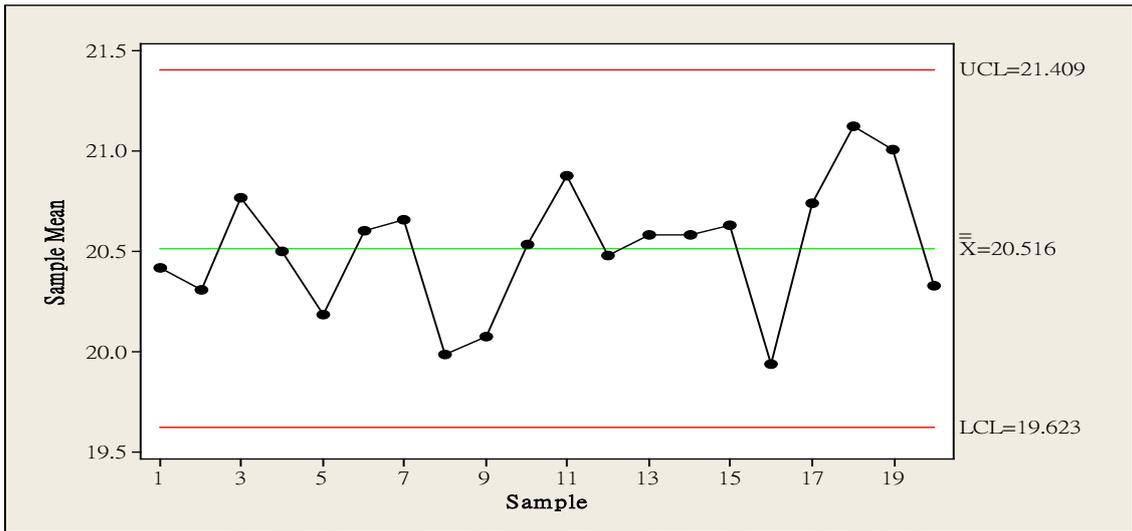


圖 3：硬度製程之 $\bar{\delta}$ 管制圖

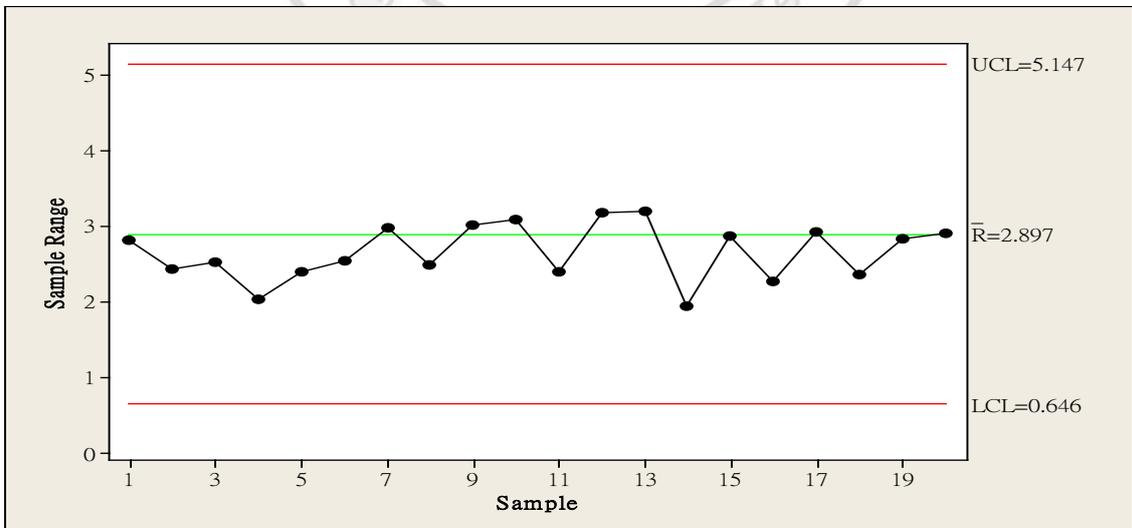


圖 4：硬度製程之 R 管制圖

很顯然的，我們由圖 3 與圖 4 的管制圖中可以發現，所有的樣本都落入管制上下限，表示硬度製程確定屬於穩定製程(in-control)；同理，我們接著抽取齒輪栓槽寬及齒輪栓槽深等 2 個製程，並將樣本資料繪入 $\bar{\delta}-R_y$ 管制圖中，2 個製程的樣本皆落入管制上下限之中，表示此二製程皆屬於穩定的製程。



第三章 考慮量測系統誤差之製程品質衡量模式

3.1 考慮量測系統誤差下之製程評估指標

量測系統誤差指的是量測儀器本身的量測誤差(Measurement Error)，重覆性(Repeatability)與再現性(Reproducibility)等的變異量，因此本研究主要目的在評估量測系統與決定量測系統的能力，將量測中所觀察到的總變異分解為產品本身固有的變異及量具的變異，並決定量測儀器或量具是否有能力量測。其總變異定義如下：

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_{product}^2 + \sigma_{Gauge}^2 \quad (5)$$

其中 σ_{Total}^2 為所觀察到的總變異、 $\sigma_{Product}^2$ 為產品本身的變異、 σ_{Gauge}^2 為量具上的變異。一般實務應用而言，會利用規格寬度或是公差範圍來估計量具能力。量測誤差通常是近似常態分配，因此 $6\sigma_{Gauge}$ 和公差範圍的比值稱為精確-公差比率或是 P/T 比率，若 P/T 比率小於或等於 0.1，則可以稱此量具有足夠的量測能力。其定義如下：

$$\frac{P}{T} = \frac{6\sigma_{Gauge}}{USL - LSL} \quad (6)$$

在量測系統能力研究時，其重覆性指的是量測儀器或量具本身固有的精密度。再現性是由不同的操作員使用相同的量測儀器或量具量測相同的產品、零件或項目多次所得之變異。因此將量具變異 σ_{Gauge}^2 分解為重覆性變異 $\sigma_{Re\ peatability}^2$ 與再現性變異 $\sigma_{Re\ producibility}^2$ ，定義如下：

$$\sigma_{MeasurementError}^2 = \sigma_{Gauge}^2 = \sigma_{Re\ peatability}^2 + \sigma_{Re\ producibility}^2 \quad (7)$$

如果可藉由參考值的關係，事先調校量測儀器的誤差，很顯然地，所量測的觀測值僅剩下量測儀器的重複性與再現性（GR&R）的誤差，所以本研究稱內含 GR&R 的製程能力指標為 OC_{pmk} ，也就是觀測到的製程能力指標，表示如下：

$$OC_{pmk} \geq \frac{d - |\mu - T|}{3\sqrt{\sigma_x^2 + (\mu_x - T)^2}} \geq \frac{d - |\mu - T|}{3\sqrt{(\sigma_{part}^2 + \sigma_{gage}^2) + (\mu_x - T)^2}} \geq C \quad (8)$$

其中 d 為規格公差的一半， $\mu_x = \mu'_x - B$ 為實際工件平均數（即調校過後的平均值） μ'_x 為觀測值， B 為量測平均偏移量， T 為目標值，而扣除 σ_{gage}^2 或當 σ_{gage}^2 趨近於 0 時，則 $\sigma_x^2 = \sigma_{part}^2$ ，此時之指標值稱之為工件真實的製程能力指標值，本研究稱之為 AC_{pmk} ，表示如下：

$$AC_{pmk} = \frac{d - |\mu - T|}{3\sqrt{\sigma_{part}^2 + (\mu_x - T)^2}} \quad (9)$$

根據(8)式，我們可以推導出 σ_{part}^2 ，表示如下：

$$\sigma_{part}^2 = \left(\frac{d - |\mu - T|}{3OC_{pmk}} \right)^2 - \sigma_{gage}^2 - (\mu_x - T)^2 \quad (10)$$

因此， AC_{pmk} 可以重新表示為：

$$AC_{pmk} = \frac{d - |\mu - T|}{3\sqrt{\left(\frac{d - |\mu - T|}{3OC_{pmk}} \right)^2 - \sigma_{gage}^2}} = \frac{1 - |\delta|}{\sqrt{\left(\frac{1 - |\delta|}{OC_{pmk}} \right)^2 - \left(\frac{3\sigma_{gage}}{d} \right)^2}} \quad (11)$$

其中 $\delta = (\mu - T)/d$ 代表製程準確度指標，目前業界大多採用 QS9000 中 GR&R 之 P/T (Precision-to-Tolerance) 接受準則，其定義如下所示：

$$P/T = \frac{5.15\sigma_{gage}}{Tolerance} \times 100\% = \frac{5.15\sigma_{gage}}{2d} \times 100\% \quad (12)$$

很顯然地， $3\sigma_{gage} / d = 6(P/T)/5.15$ ，所以：

$$AC_{pmk} = \frac{1 - |\delta|}{\sqrt{\left(\frac{1 - |\delta|}{OC_{pmk}}\right)^2 - \left(\frac{6(P/T)}{5.15}\right)^2}} \quad (13)$$

在正常的情況之下，我們期望量測變異不會影響製程能力的判定，若量測變異愈小，則觀測製程能力指標值會愈接近真實製程能力指標值。由(13)式可知，P/T 值會影響 AC_{pmk} 和 OC_{pmk} 之間的接近程度，如果 P/T 值愈小，則觀測製程能力指標 OC_{pmk} 會愈接近真實製程能力指標 AC_{pmk} 。

3.2 精密機械齒輪製程之品質衡量模式

根據表 1 所列出的硬度、齒輪栓槽寬及齒輪栓槽深等 3 個重要品質特性製程皆為望目型，所以根據 Chen et al. (2003)、Chen et al. (2006)的觀念，必須每一個品質均符合要求時，該產品才會被顧客所接受。Pearn et al (1992) 曾以指標 C_{pmk} 作為評估指標，且 Chen et al. (2001) 整合所有個別品質特性製程而成為一個可以反應製程及產品良率之製程能力總指標。根據 Pearn et al (1992) 指出， C_{pmk} 指標是基於良率所訂定的優良指標，與良率有 $2\Phi(3C_{pmk})-1$ 的數學關係，當指標值愈大代表製程能力愈佳。因此，本研究將根據 C_{pmk} 指標並考慮量測系統誤差下發展 AC_{pmk} 指標評估模式，作為評估精密機械齒輪各個重要品質特性製程能力的工具，其定義如下所示：

$$AC_{pmk} = \frac{1-|\delta|}{\sqrt{\left(\frac{1-|\delta|}{OC_{pmk}}\right)^2 - \left(\frac{6(P/T)}{5.15}\right)^2}} \quad (14)$$

事實上， AC_{pmk} 指標是一個可以同時反應製程準確度及製程精確度的製程良率指標，因此可評估出較精確的製程能力。根據(8)式的概念，我們可以假設當 $AC_{pmk} = C$ 時，則：

$$P_i \geq 2\Phi(3C)-1 \quad (15)$$

其中 Φ 為標準常態分配函數， p_i 代表第 i 個重要品質特性製程的良率。當製程能力指標 AC_{pmk} 之指標值(C)愈大時，則製程良率愈高。由於整個精密機械齒輪的前後製程是獨立的，所以整個精密機械齒輪的產品良率與 3 個重要製程品質特性的關係式如下所示：

$$P \geq \prod_{j=1}^3 P_j \geq \prod_{j=1}^3 [2\Phi(3AC_{pmk}) - 1] \quad (16)$$

根據上述的關係式，本研究定義一個可以反應整個精密機械齒輪產品良率的產品品質指標，其定義如下所示：

$$C_T = \left(\frac{1}{3}\right) \Phi^{-1} \left\{ \left[\prod_{j=1}^3 (2\Phi(3AC_{pmk}) - 1) + 1 \right] \div 2 \right\} \quad (17)$$

根據 Huang et al. (2002)、Chen et al. (2003)與 Chen et al.(2006)的觀念，若希望整個精密機械齒輪之產品品質指標值要達到顧客要求的水準，則每一個重要品質特性製程的製程指標值必須比整個精密機械齒輪產品之指標值要高。假設整個精密機械齒輪之產品品質指標值要求為 $C_T = v$ 時，即

$$C_T = \left(\frac{1}{3}\right) \Phi^{-1} \left\{ \left[\prod_{j=1}^3 (2\Phi(3AC_{pmk}) - 1) + 1 \right] \div 2 \right\} = v \quad (18)$$

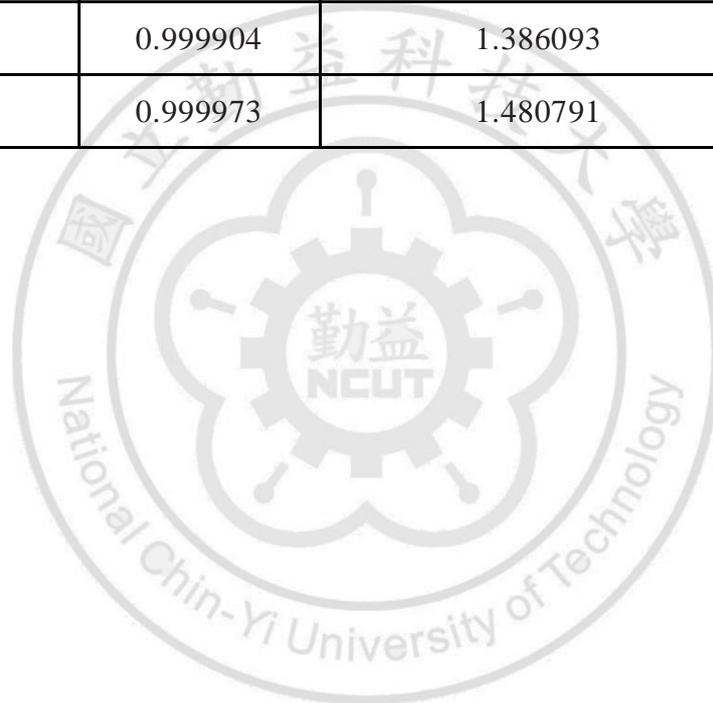
若要求每一個重要品質特性製程的製程指標值 AC_{pmk} 均相同且為 w 時，即根據(17)式可推導出 w 值如下所示：

$$w = \left(\frac{1}{3}\right) \Phi^{-1} \left(\frac{\sqrt[3]{2\Phi(3v) - 1} + 1}{2} \right) \quad (19)$$

表 3 為各種 C_T 值(v)所對應之 AC_{pmk} 值(w)及其良率對照表；事實上，隨著品質特性個數的不同，其 w 與 v 值會跟著不同而改變，而不管是 C_T 或是 AC_{pmk} ，其與良率的不等式關係均等於(18)式的不等式；舉例而言，若要求整個精密機械齒輪產品品質指標值 $C_T = 1$ (即產品良率為 99.73%)，則 3 個重要品質特性製程的 AC_{pmk} 值均須大於 1.106608，才能保證整個精密機械齒輪產品達到 $C_T = 1$ 的品質水準。

表 3：各種 C_T 值(v)所對應之 AC_{pmk} 值(w)及其良率對照表

產品品質指標 $C_T(v)$	產品良率	重要製程指標 $AC_{pmk}(w)$	製程良率
1.00	0.997300	1.106608	0.999099
1.05	0.998367	1.152612	0.999455
1.10	0.999033	1.198871	0.999677
1.20	0.999682	1.292080	0.999894
1.30	0.999904	1.386093	0.999968
1.40	0.999973	1.480791	0.999991



第四章 六標準差之 MAIC 品質改善流程

目前精密機械齒輪產品之製程品質評估並不是很完備，有些學者只有評估製程而並沒有針對該製程提供一套改善的方法；根據 Ham et al. (2002)指出，MAIC 的流程定義為：Measure（衡量）：量測現在表現的實況；Analyze（分析）：分析造成問題的原因；Improve（改善）：提出相關的改善對策；Control（控制）：建立控制機制確定改善後的精確與穩定。因此，本研究接著將應用 Ham et al. (2002) 所提出的六標準差 MAIC 模式，透過 MAIC 的改善流程來提昇精密機械齒輪產品的製程品質。

4.1 衡量與分析

由於精密機械齒輪產品有 3 個重要品質特性製程，且每個重要品質特性的規格是望目且屬對稱公差，因此本研究將參考 Chen et al. (2008) 的方法，根據量測系統誤差的觀點所提出的 AC_{pmk} 評估指標，發展一個可以評估精密機械齒輪產品之多品質特性之製程能力分析圖 (Multi-Characteristic Product Capability Analysis Chart-MPCAC / AC_{pmk})，使所分析的重要品質特性製程之規格公差可由 (LSL,T,USL) 透過標準化的概念轉變為 (-1,0,1)，在分析圖上同時評估 3 個重要品質特性之製程能力。

如前所述，製程準確度指標 $\delta = (\mu - T)/d$ 及製程精確度指標 $\gamma = \sigma/d$ ，所以本研究將根據此二項指標並修改 C_{pmk} 指標，發展出 AC_{pmk} 指標評估模式來衡量多品質特性之產品品質，接著發展多品質特性製程能力分析圖 (Multi-Characteristic Product Capability Analysis Chart-MPCAC / AC_{pmk})，評估多品質特性製程之產品品質。首先，本研究發展之 AC_{pmk} 指標公式表示如下：

$$AC_{pmk} = \frac{1 - |\delta|}{\sqrt{\left(\frac{1 - |\delta|}{OC_{pmk}}\right)^2 - \left(\frac{6(P/T)}{5.15}\right)^2}} \quad (22)$$

當 $AC_{pmk} \geq C$ 且 $\sigma = 0$ ($P/T = 0$) 時，則公式(22)可重新表示如下：

$$\begin{aligned}
 AC_{pmk} &= \frac{1-|\delta|}{\sqrt{\left(\frac{1-|\delta|}{OC_{pmk}}\right)^2 - \left(\frac{6(P/T)}{5.15}\right)^2}} \geq C \\
 \Rightarrow \frac{1-|\delta|}{\frac{3(1-|\delta|)|\mu-T|}{d-|\mu-T|}} &\geq C \\
 \Rightarrow 3C|\mu-T| &\leq d-|\mu-T| \\
 \Rightarrow T - \frac{d}{3C+1} &\leq \mu \leq T + \frac{d}{3C+1} \tag{23}
 \end{aligned}$$

當衡量單一製程品質時，只須將製程品質水準(即 AC_{pmk} 值)與製程規格公差代入公式(23)，即求出多品質特性製程能力分析圖之製程準確度指標(X軸)範圍。因此，分析多項製程品質特性時，可將其公式(23)透過標準化概念，將不同製程規格標準化，使其製程在相同的基礎下進行衡量。根據公式(23)將其標準化轉換如下：

$$\begin{aligned}
 T - \frac{d}{3C+1} &\leq \mu \leq T + \frac{d}{3C+1} \\
 \Rightarrow \frac{\left(T - \frac{d}{3C+1}\right) - T}{d} &\leq \frac{\mu - T}{d} \leq \frac{\left(T + \frac{d}{3C+1}\right) - T}{d} \\
 \Rightarrow -\frac{1}{3C+1} &\leq \delta \leq \frac{1}{3C+1} \tag{24}
 \end{aligned}$$

因此，根據公式(24)計算出製程準確度指標(δ)後，即可計算製程精確度指標(γ)，其公式推導如下：

$$\begin{aligned}
AC_{pmk} &= \frac{1-|\delta|}{\sqrt{\left(\frac{1-|\delta|}{OC_{pmk}}\right)^2 - \left(\frac{6(P/T)}{5.15}\right)^2}} = \frac{1-|\delta|}{\sqrt{\left(3\sqrt{\gamma^2 + \delta^2}\right)^2 - \left(\frac{18\gamma}{5.15}\right)^2}} = C \\
\Rightarrow \frac{1-|\delta|}{\sqrt{9\gamma^2 + 9\delta^2 - \left(\frac{18\gamma}{5.15}\right)^2}} = C &\Rightarrow \left(\frac{1-\delta}{C}\right)^2 = 9\gamma^2 + 9\delta^2 - \left(\frac{18}{5.15}\right)^2 \gamma^2 \\
\Rightarrow \gamma &= \sqrt{\frac{9\delta^2 - \left(\frac{1-\delta}{C}\right)^2}{3.21}} \tag{25}
\end{aligned}$$

根據 Huang et al. (2002) 與 Chen et al. (2006) 的研究指出，Motorola 的六個標準差品質水準是指製程標準 $\sigma = d/6$ 且容許製程偏移 1.5σ ，即 $\sigma = 1/6$ 且 $\delta \leq 0.25$ 。若依照這個情況，則 6 個標準差所對應的 C_T 下限值須大於 0.838，即 $C_T \geq 0.838$ ，此時由於精密機械齒輪產品具有 3 個重要品質特性，根據(19)式可換算出所對應的個別品質特性指標 AC_{pmk} 的下限值 $AC_{pmk} \geq 0.954$ ，依此方法可分別計算出 6 個 Sigma、5 個 Sigma 和 4 個 Sigma 時各種品質水準所對應的 C_T 與 AC_{pmk} 下限值如表 4 所示。

表 4：精密機械齒輪之產品與個別重要品質特性製程能力之品質水準表

品質水準	產品 C_T 指標值	品質特性指標 AC_{pmk} 值
6 Sigma	$C_T \geq 0.838$	$AC_{pmk} \geq 0.954$
5 Sigma	$C_T \geq 0.647$	$AC_{pmk} \geq 0.790$
4 Sigma	$C_T \geq 0.462$	$AC_{pmk} \geq 0.630$
3 Sigma	$C_T \geq 0.277$	$AC_{pmk} \geq 0.469$

根據表 4 所列出的各種品質水準所對應的 AC_{pmk} 值，接著可以根據公式(24)與(25)而繪製各 AC_{pmk} 值的等高線圖而形成多品質特性製程能力分析圖

如圖 5 所示，其橫座標為 δ 且縱座標為 γ ；很顯然每一個座標點 (δ, γ) 都代表一個製程，只要將每一製程的座標點描繪於分析圖上，即可根據其位置而判斷其製程的品質狀況。

本研究將以台灣某精密機械齒輪工廠為研究對象，該公司主要產品為汽機車、風力發電、農用機與工具機等所用之精密機械齒輪。若該公司要求產品的品質水準需達 5 個標準差，即要求 $C_T \geq 0.647$ ，而由於精密機械齒輪產品有 3 個重要品質特性製程，所以要求每一品質特性之個別指標值為 $AC_{pmk} \geq 0.790$ ，接著以 δ 為橫座標， γ 為縱座標畫出 AC_{pmk} 的等高線圖，如圖 5 所示。

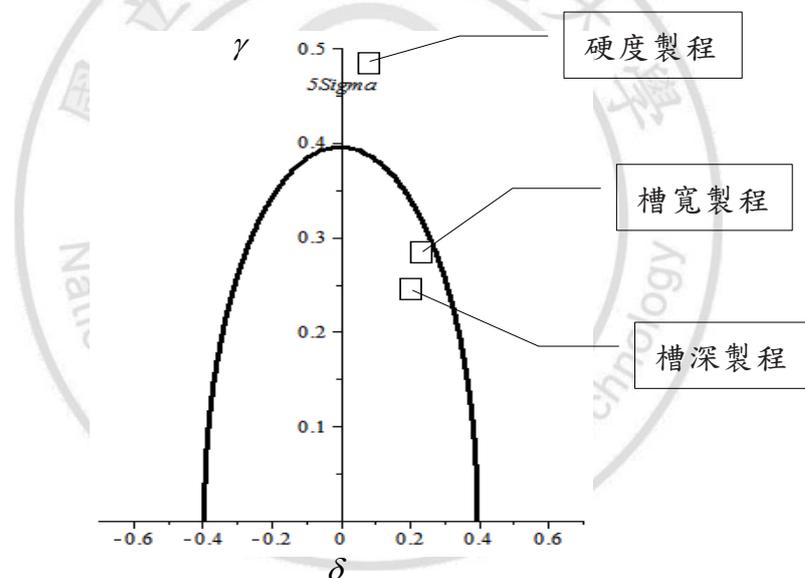


圖 5：多品質特性之製程能力分析圖(MPCAC/ AC_{pmk})

本研究於穩定的製程中取每一組樣本大小(Sample size) n 為 10，共截取 $m = 20$ 組，分別計算 $\bar{\delta}$ 、 \bar{R}_γ ，再根據公差 d 與目標值 T 計算出指標值 δ 與 γ 的座標於表 5，並將其座標描繪於多品質特性之製程能力分析圖(Multi-Characteristic Product Capability Analysis Chart-MPCAC / AC_{pmk})，如圖 5 所示。

表 5：重要品質特性製程參數資料表

品質特性	規格	準確度(δ)	精確度(γ)	製程能力現況
槽寬製程	6.009 ± 0.018	0.3350	0.2950	符合製程水準
槽深製程	21.85 ± 0.05	0.2565	0.2692	符合製程水準
硬度製程	20 ± 2	0.1504	0.5467	精確度不足

在圖 5 的各品質特性製程座標點中，槽寬製程與槽深製程等 2 個重要品質特性製程達到 5 個 *Sigma* 的品質水準，另外硬度製程未達到 5 個 *Sigma* 的品質水準，很顯然的其準確度夠但精確度不足(σ 太大)，接著本研究選定硬度製程為改善專案，進行分析並改善其製程精確度。

承前述，精密機械齒輪製程之硬度明顯不足，因此改善的排序為第一優先；而本研究接著針對精密機械齒輪製程進行專案分析，由於影響精密機械齒輪硬度的參數眾多，根據 Chen et al.(2003)指出，一般常用於分析的工具具有特性要因圖、甘特圖、製程能力分析、品質機能展開等等；而 Chen et al.(2006)曾以特性要因圖(cause-and-effect diagram)分析 TFT-LCD 製程績效不彰的原因，並加以改善，獲得很好的成效；因此本研究將以 cause-and-effect diagram 作為分析導致精密機械齒輪硬度不足的工具，如圖 6 所示。

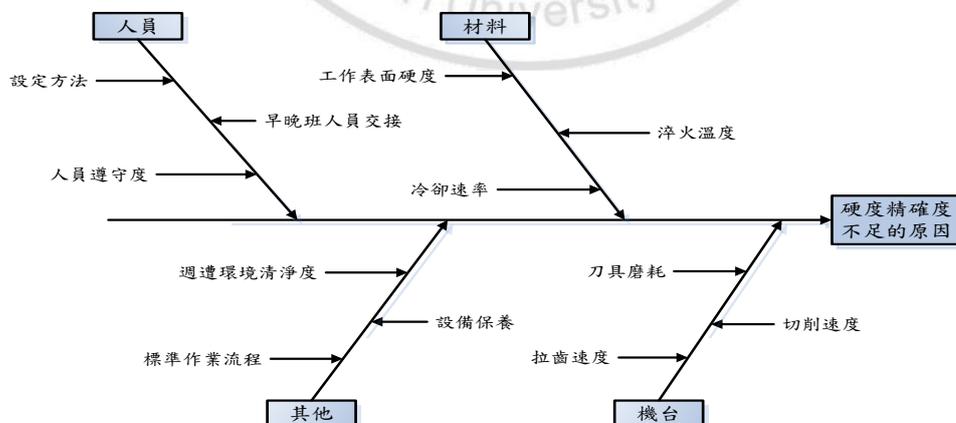


圖 6：硬度精確度不足之特性要因圖

4.2 改善與控制

本研究根據上述之特性要因圖，並與品保檢驗師討論歸納後，發現精密機械齒輪中的工作表面硬度、冷卻速率、淬火溫度為造成精密機械齒輪硬度精確度不足的主要原因。根據 Ross (1988)與 Taguchi (1991)指出，田口實驗設計是以實驗的方式來決定設計參數，主要是依控制因子及其水準的數目選用適當的實驗直交表，並以 S/N 比替代品質損失函數來減少交互作用，能在最短時間、最低成本與最少實驗次數下，對產品設計與品質提供穩健性。因此，為了得到較佳的設計參數，本研究將使用田口實驗設計方法(Design of experiments)進行分析。

表 6：控制因子水準表

		Level 1	Level 2	Level3
A	工作表面硬度(HR)	21	18	19
B	冷卻速率(min)	12	17	22
C	淬火溫度(°C)	140	155	160

如前所述，本研究將造成精密機械齒輪硬度不足的分析結果，選擇控制因子和其水準如表所示，並以田口實驗設計方法找出最佳參數設計。本實驗共有三個 3 水準因子，自由度為 8，因此我們採用 $L_9(3^3)$ 直交表，而 L_9 直交表也是田口博士高度推薦的直交表之一 (Taguchi (1991))； $L_9(3^3)$ 直交表如表 7，而實驗結果也列於表中。

表 7： $L_9(3^3)$ 直交表實驗結果

Experiment Number	Parameters and Levels			Result	
	A	B	C	回應值	S/N
1	1	1	1	0.69	-3.22302
2	1	2	2	0.70	-3.09804
3	1	3	3	0.56	-5.03624
4	2	1	2	0.57	-4.88250
5	2	2	3	0.56	-5.03624
6	2	3	1	0.87	-1.20961
7	3	1	3	0.44	-7.13095
8	3	2	1	0.93	-0.63034
9	3	3	2	0.80	-1.93820

根據 Ross (1988)與 Taguchi (1991)指出，S/N 比是指信號與雜訊(signal to noise)比值的簡稱。如果 S/N 比愈大，表示信號的強度比雜訊愈大，就更容易分辨接收到的是信號還是雜訊。S/N 比的推算，是將損失函數直接取對數值轉換而得，作為產品績效衡量的準則，主要在於減少交互作用的產生，以增強產品穩健的穩健性。

我們可以將表 6 的因子，經實驗設計得到表 7 實驗結果的 S/N 比，S/N 比越大表示精密機械齒輪硬度不足越小，代表精密機械齒輪製程品質水準愈好，經表 7 實驗的結果將可以得到最佳參數解，如圖 7 所示。

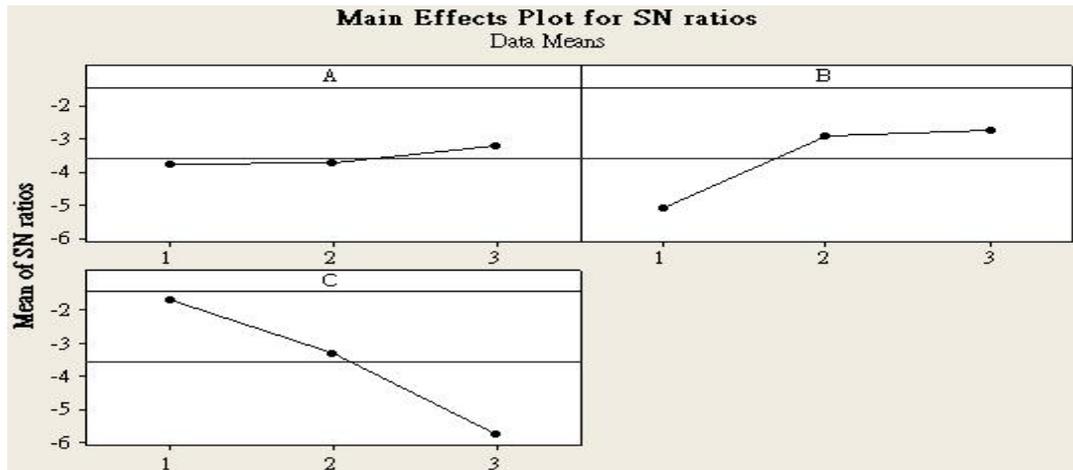


圖 7：最佳參數設定圖

根據上述實驗的結果，我們將可以獲得精密機械齒輪硬度的最佳參數設定，使硬度製程的精確度為最佳，接著本研究將採用公式(3. a)、(3. b)、(3. c)的 $\bar{\delta}$ 管制圖及公式(4. a)、(4. b)、(4. c)的 \bar{R}_x 管制圖，持續監控精密機械齒輪製程品質，使產品符合顧客要求的品質水準，進而提升產業競爭力。

第五章 結論

台灣精密機械齒輪面對全球化的浪潮與資訊網路興起的新世代，精密機械齒輪業者不僅是應在新式硬體設備上的投資，更須提升產品品質以符合客戶需求與服務，提升產業的層次，才有機會與歐美日等技術先進國家並駕齊驅。因此，本研究首先針對精密機械齒輪產品探討其製造流程，整理出重要品質特性製程，發展其 $\delta - R_y$ 管制圖，以確定製程為穩定製程(in-control)，接著依照這些重要品質特性參考 Pearn et al. (1992) 的方法，並考慮量測系統誤差提出 OC_{pmk} 評估指標，訂定產品品質指標值 (C_T) 與重要製程指標值 (AC_{pmk})，並發展一個可以評估精密機械齒輪產品之多品質特性之製程能力分析圖 (Multi-Characteristic Product Capability Analysis Chart - MPCAC / AC_{pmk})，可以根據各品質特性之指標值的落點位置得知該品質特性的精確度與準確度是否足夠。

如前所述，本研究接著透過 Ham et al. (2002) 提出之六標準差 MAIC 流程，對於製程能力不足之重要品質特性製程，分析其造成製程能力不足(準確度或精確度)的原因，找出其重要的影響因子，再透過田口實驗設計找出相對應的最佳製程參數，以提升精密機械齒輪產品之製程品質，最後以本研究推導之 $\bar{\delta} - \bar{R}_y$ 管制圖監控其製程品質，透過持續不斷改善的機制，協助精密機械齒輪產品業者提升製程之效率與品質。

參考文獻

英文文獻

1. Chan, L. K., Cheng, S. W., and Spring, F. A., 1988 “A new Measure of Process Capability C_{pm} ”, *Journal of Quality Technology*, 20(3), 162-175.
2. Chen, K. S., Pearn, W. L., and Lin. P. C., 2003 “Capability Measures For processes With Multiple Characteristics,” *Quality & Reliability Engineering International*, 19(2), 101-110.
3. Chen, K. S., Wang, C. H. and Chen, H. T. 2006 “A MAIC Approach to TFT-LCD Panel Quality Improvement”, *Microelectronics & Reliability*, 46(7), 1189-1198.
4. Chen, K. S., Wu, C. H., and Chen, S. C.*, 2008 “Criteria of Determining the P/T Upper Limits of GR&R in MSA”, *Quality & Quantity*, 42 (1), 23-33.
5. Chen, K. S., Ouyang, L. Y., Hsu, C. H. and Wu, C. C. 2009 “The Communion Bridge to Six Sigma and Process Capability Indices”, *Quality & Quantity*, 43 (3), 463-469.
6. Ham, C. H., and Lee, Y. H., 2002 “Intelligent Integrated Plant Operation System for Six Sigma”. *Annual Reviews in Control*; 26, 27-43.
7. Huang, M. L., Chen, K. S., and Hung, Y. H., 2002 “Integrated Process Capability Analysis with an Application in Backlight,” *Microelectronics & Reliability*, 42(12), 2009-2014.
8. Juran, J. M., 1974, *Jurans Quality Control Handbook*. McGraw Hill, New York.
9. Kane, V. E., 1986 “Process Capability Indices”, *Journal of Quality Technology*, 18(1), 41-52.
10. Montgomery, D. C., 2004, *Introduction to Statistical Quality Control*. 5th, NY: John Wiley & Sons Inc, New York.
11. Pearn, W. L., Kotz, S. and Johnson, N. L., 1992. “Distributional and Inferential Properties of Process Capability Indices,” *Journal of Quality Technology*, 24(4), 216-231.

12. Ross P. J., 1988, Taguchi Techniques for Quality Engineering. McGraw-Hill, New York.
13. Taguchi G., 1991, Introduction to Quality Engineering. White Plains, New York: Asian Productivity Organization, UNIPUB.
14. Wang, C. C., Chen, K. S., Wang, C. H., and Chang, P. H., 2011 “Application of 6-Sigma Design System to Developing an Improvement Model for Multi-Process Multi-Characteristic Product Quality”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B – Journal of Engineering Manufacture, 225(7),1205-1216.

