

具微型油袋之滑動面摩擦特性實驗探討

蔡志成、賴勇澍、王信誌、林明賢

國立中興大學機械工程學系

國科會計畫編號：NSC100-2221-E-005-024-MY2

摘要

滑動機構是被廣泛應用的運動機構，滑動面常經手工鏟花在其表面形成多個能含油的油袋以降低滑動摩擦力，但其效果亟需有系統地探討，本研究透過實驗規劃，在滑塊表面以 CNC 加工機加工具斜楔之微型油袋，有系統地分析不同油袋紋理配置對其摩擦特性的影響。研究使用田口實驗規劃法設計滑塊表面油袋紋理配置以降低實驗的數量，並以全因子實驗探討 36 種使用條件之影響，研究探討之使用條件包括滑塊負載、潤滑油以及滑動速度。經實驗數據分析可歸納各使用條件下之最佳油袋紋理配置，再經整理篩選四種出現頻率較高之紋理，進一步加工滑塊進行驗證實驗，在相同使用條件下，其摩擦係數較原滑塊分別降低 13% 至 26%、22% 至 36%、28% 至 42%，以及 46% 至 63%，顯示除在滑動面使用微型油袋可有效降低運動之滑動摩擦，亦驗證本研究使用之方法可有效配置較佳之油袋紋理。

關鍵字：滑動摩擦、微型油袋、紋理配置

1. 前言

工具機為國家產業之基礎，根據經濟部與財政部統計，2011 年台灣工具機產業產值超過 50 億美元，為全球第六，較 2010 年成長 34.5%，其中出口值超過 40 億美元，成長 35.1%，其值超越瑞士而與義大利相當，為世界第四，顯示該產業已成為我國重要的產業[1]。但與日本與德國等先進國家比較，單機價格仍有甚大差距，其原因在於機械性能的技术掌握尚不足，以使用於重負載之高精度工具機進給系統之硬軌為例，硬軌為兩個接觸面相互滑動，在接觸面上會以人工鏟花以改善其磨潤效果，如圖 1 所示為典型之工具機滑軌鏟花面，其鏟配技術是提升機械性能的重要關鍵技術之一。

工具機之硬軌為典型的滑動機構，此種機構是常見的運動機構之一，被廣泛地運用在機械的進給系統，硬軌使用手動鏟花除了

使其達到機台要求的幾何精度之外，並在其表面形成多個油袋使其具含油效果，於運動時降低摩擦力；然而手動鏟花是一種師徒傳承之工藝技術，故加工品質因人而異，所產生之運動性能也因此不一，故亟需以穩定的加工方法且有系統地探討滑動面之摩擦特性。

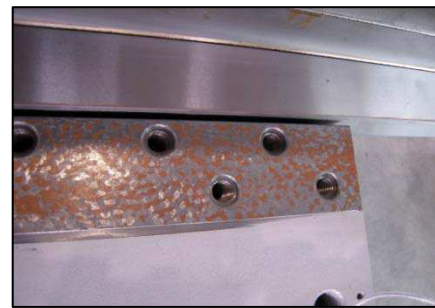


圖 1：典型之工具機滑軌鏟花面

鏟花是發展已久的工藝技術，對滑動面提供磨潤功能還是以大尺度的鏟花為主，例如 Tsutsumi 等人[2]開發自動鏟花機，可將研磨表面經過全面溝槽鏟花後透過 CCD 檢測技術自動鏟除高點，其位置判別誤差平均在 0.22mm，平面度則可控制在 11.6 μ m。國內學者包括蔡穎堅、范光照、覺文郁等學者亦投入相當人力與資源進行鏟花機構的研發以及鏟花表面幾何的量測等相關課題的研究探討[3-5]，而精密機械研究中心在鏟花工藝的研習以及人才的培訓亦有多年的成效[6]。

至於滑動面之摩擦探討，近代研究發現在接觸表面加工紋路有助於降低摩擦力，許多學者運用不同的加工技術在接觸表面製作紋路以提昇其磨潤的效果。例如 Pettersson 與 Jacobson[7]以鍍膜加工的方式在平面上加工出紋路凹槽，以球面接觸加工表面進行相對滑動觀察各種不同加工紋路對於摩擦磨潤的效果，結果發現無加工表面磨潤效果最差，平行滑動面條紋效果較垂直條紋好，微小方型凹槽又比條狀凹槽好，點數越小效果越好，陣列點型與滑動方向呈 30 度比平

行好。而 Valeri 等人[8]在金屬圓盤上加工微小圓形凹坑，以圓柱在加工面上長距離滾動，潤滑條件控制在乾摩擦及乏油潤滑的情況下，觀察摩擦係數的變動，發現在乏油潤滑輕負載時雷射加工表面有效的降低了摩擦係數，且有效地降低了摩擦係數的變動。Costa 與 Hutchings[9]則在金屬接觸面上加工紋路後用圓柱探頭以線接觸的方式與加工面進行相對滑動，結果發現滑動方向與紋路幾何形貌具有相關性，其中線型的效果較點型來的好。

Sekimizu 等人[10]則以摩擦量測的方式比較研磨與鍍花間在功能面的差異，量測數據顯示鍍花在摩擦係數表現上較研磨好，低速較高速好，高真平度表現也較低真平度好，但在徑向位移以研磨搭配銑削溝槽效果較鍍花好。隨後更進一步以摩擦實驗比較研磨加工與鍍花在性能上之差異，其研究顯示研磨面在高速滑動時其摩擦係數會較鍍花面更快速提升，這是由於研磨面平面度較好，容易造成滑動時傾斜角效應，而平面度較好的鍍花面在高速滑動時摩擦係數也較平面度較差的鍍花面來的高，在研磨表面加工溝槽可有效減緩傾斜角效應，因此在高速運行下摩擦係數也不會快速增加[11]。凌國夏[12]亦曾經由田口法分析影響摩擦係數的重要性，依序為表面粗糙度、表面形貌、負載壓力、滑動速度以及潤滑油量，在長距離 1000m 磨耗實驗中，工件表面產生的油袋發揮儲油功能使潤滑油膜不易破裂，及其產生之微高點可在對磨中快速的被磨平，產生可以支撐負載的絕佳滑動面，因而降低摩擦係數及磨耗量。

近期 Ogawa 等人[13]曾以表面噴沙在金屬表面加工紋路，並以兩金屬平面相互滑動的方式進行潤滑摩擦實驗，同時比對與鍍花加工面潤滑效果之差異，實驗結果發現鍍花加工表面有效地縮小了邊界潤滑的範圍，而主要為在較低速度即可成為混合潤滑。而蔡志成等人[14]亦曾利用 CNC 在滑塊表面加工不同紋理，探討每平方英寸之凸點數(PPI)、每平方英寸之點數所佔面積百分比(POP)等紋理幾何參數對滑動面摩擦之影響，其研究顯示機械加工紋理以 PPI 為 40、POP 為 50% 形貌凹坑油袋的滑塊在摩擦係數表現上最接近人工鍍花。

上述文獻顯示適當的鍍花可降低運動面的摩擦，尤其採用油袋型紋理效果更為顯著。故本研究針對此課題，透過實驗設計，採用穩定的 CNC 加工方式，於滑塊表面加工不同的油袋紋理配置，以模擬鍍花功能，

並搭配不同的使用條件進行實驗，以系統化探討滑動面的摩擦特性。

本研究之步驟如圖 2 所示，首先經由文獻整理分析鍍花面之功能與幾何指標，作為設計油袋紋理配置與使用條件實驗規劃表面紋理之依據；再根據所設計之紋理式樣以 CNC 加工中心機配合刀具於鑄鐵塊加工，並量測加工結果。隨後根據設計之使用條件進行摩擦力量測，再根據實驗數據之分析比較，選擇較佳之油袋紋理，最後根據所選用之紋理組合加工滑塊進行驗證實驗，以確認實驗之有效性。

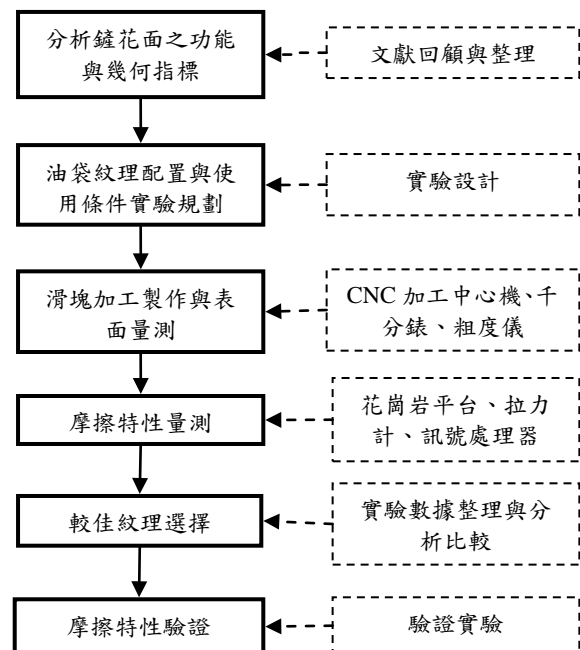


圖 2：本研究之研究步驟與使用方法及設備

2. 實驗設計與規劃

本研究考慮滑塊加工時間耗時，油袋紋理配置實驗使用田口實驗規劃法進行設計以降低實驗的數量。此外，鑑於摩擦特性與使用條件有關，故設計之紋理配置將在不同使用條件下進行測試，本研究探討的使用條件包括滑塊負載、滑動速度以及潤滑油品種類，茲詳述實驗之設計與規劃於后。

2.1 油袋設計與紋理配置之實驗規劃

參考鍍花造成之油袋具含油效果，本研究考量三角形油袋能產生動壓油膜的效果，故油袋的設計以斜楔型的三角形為主。又鑑於油袋的分佈對於磨潤效果有甚大影響，故油袋採用分散之配置，以探討該紋理配置之效果，如圖 3 所示之示意圖。

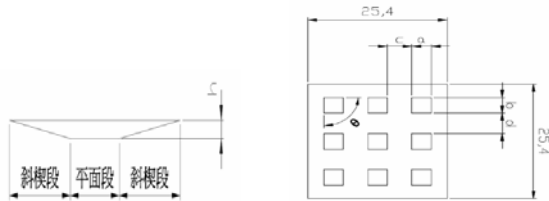


圖 3：油袋形貌與分佈配置示意圖

油袋與其配置具有不同組合，本研究根據文獻與前其研究成果「」，選擇 POP、PPI、油袋深度 h 以及油袋與運動方向夾角 θ 等四項幾何參數為實驗之控制因子，各因子根據前期研究結果取三水準，其配置如表 1 所示。鑑於滑塊加工製作耗時，各因子取三水準，加上使用條件之配置，實驗數量亦大幅增加，故本研究利用田口實驗規劃法來設計實驗控制因子之組合。

表 1：油袋紋理配置之控制因子與實驗水準

因子	水準一	水準二	水準三
A：POP(%)	30	50	70
B：PPI	9	25	36
C：夾角 $\theta(^{\circ})$	90	45	30
D：深度 h(μm)	20	40	60

根據上述選擇之油袋配置幾何參數，四個控制因子水準數均為 3，故其因子總自由度為 8，實驗不考慮各因子間交互作用，故採用 $L_9(3^4)$ 直交表進行實驗配置，其實驗配置如表 2 所示，油袋配置之紋理圖樣如圖 5 所示。

由於本研究目標在於摩擦係數，亦即品質特性為望小特性，選取各別參數因子 S/N 值最大者，作為該實驗的較佳參數因子組合，最後再進行驗證實驗，確認較佳的油袋幾何與紋理配置組合。

表 2：油袋紋理配置與實驗之 L_9 配置

EXP	POP	PPI	運動方向	深度
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

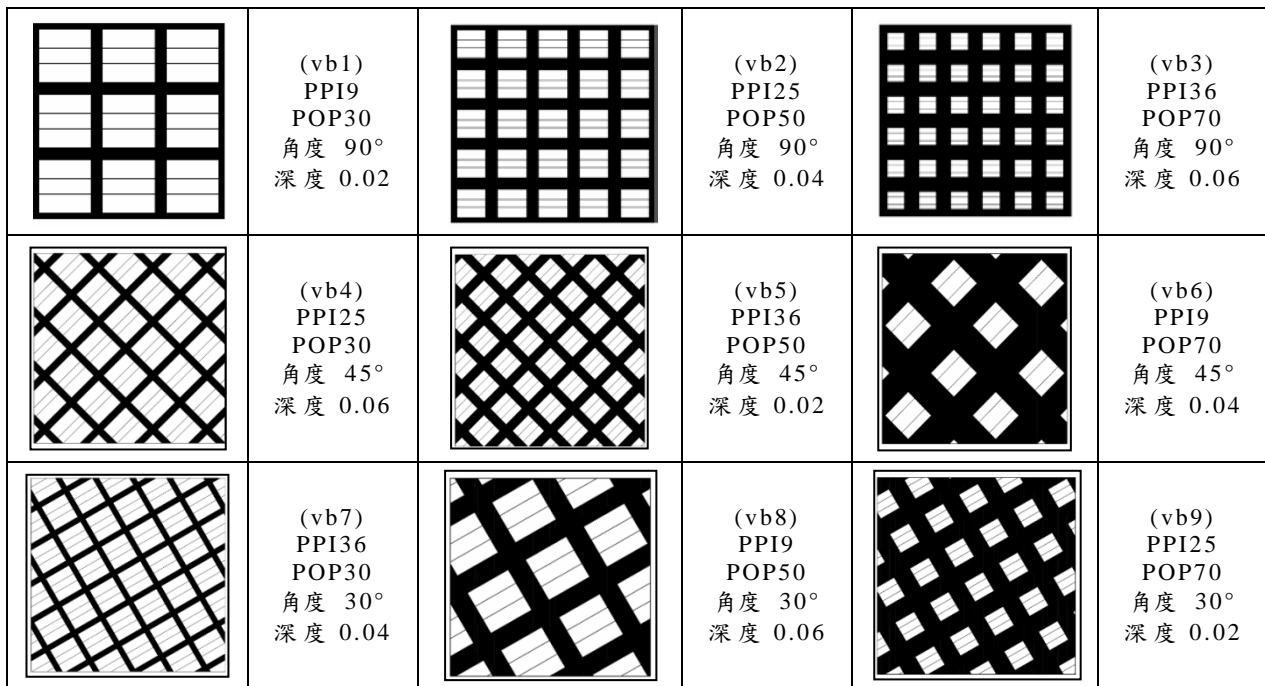


圖 5：本研究滑塊之油袋紋理配置圖

2.2 油袋紋理加工

在一英吋平方的面積下，使用不同的 POP 搭配不同的 PPI 時，會產生一定比例大

小的高點與低點面積，例如 PPI 為 9 點時、POP 為 30%，產生 axa 正方形油袋稱為低點與 cxd 的高點。本次使用低點是正方形的外型，而近來有許多研究針對與滑動方向平行

或是垂直的條紋路進行實驗及分析，且從研究顯示，表面紋理會影響磨潤行為，因此設計了與滑動方向呈 90°、45°及 30°的紋理型式。

依據田口法直交表 $L_9(3^4)$ 的規劃，我們需製作九塊滑塊搭配不同的紋理參數，PPI、POP、運動方向與鏟花深度等做出不同的變化，希望藉由少量的樣品製作過程與實驗次數，得到系統化與正確的數據，如圖 2.4 所示。

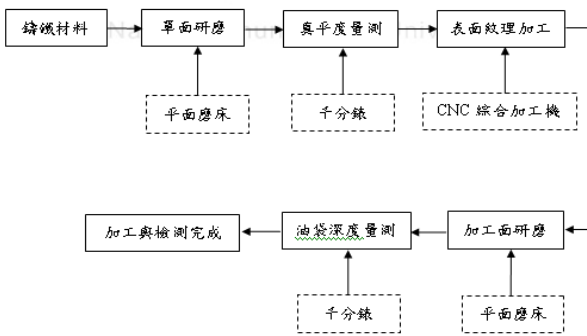


圖 6：油袋紋理加工流程圖

2.3 使用條件設計與量測設備架設

根據文獻以及前期研究成果顯示，使用條件亦為影響滑動摩擦之重要因素，故本研究設計三種較常使用的條件，分別為滑塊滑動速度、滑塊負載以及潤滑油種類，再依據這三種使用條件來進行全實驗以分析在不同使用狀況下，表面油袋紋理對摩擦係數的影響，如表 3 為使用條件參數及實驗水準。至於量測滑塊之運動摩擦力，本研究之實驗乃在滑動面添加潤滑油後在不同使用條件下運動並量測其摩擦力，研究使用推拉力計配合夾具進行量測，滑塊與滑動面相對之等速運動則利用 CNC 加工中心機之運動配合加速規量測確認，運動行程為 400mm，量測設備架設之示意圖與實際架設如圖 7 所示。

表 3：使用條件參數及實驗水準

使用條件	水準一	水準二	水準三	水準四
運動速度 (mm/min)	500	1500	2500	3500
負載 (kg)	6	12	16	
潤滑油	#32	#68	#150	

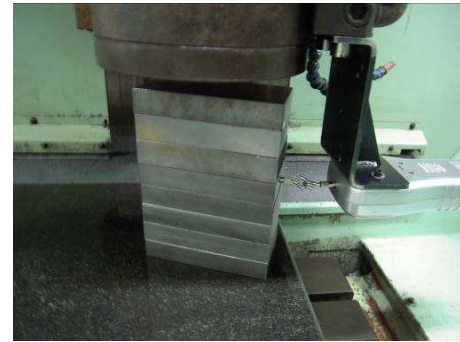
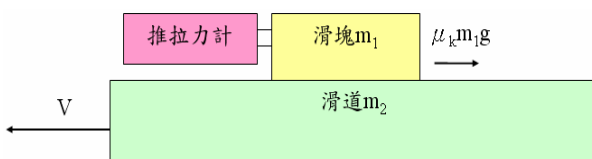


圖 7：摩擦力量測架設示意圖與實際架設

3. 實驗結果與討論

鑒於實驗數據甚為龐大，本文僅提出具代表性之實驗結果，分析各滑塊於不同使用條件下之摩擦特性，作為進一步油袋紋理配置組合之依據。

圖 8 所示為滑塊 vb3 滑塊在無潤滑油與在使用 68 號潤滑油條件下負載 6kg 及速度 500mm/min 之滑動摩擦力比較，數據顯示無油之乾摩擦明顯較大，而使用潤滑油之摩擦力在開始滑動時比較大，而後逐漸降低漸達穩定，推測開始滑動時為黏滯摩擦 (Stick slip) 所造成，一旦開始運動後，油袋內所集之潤滑油在摩擦面形成油膜，使得摩擦力漸趨穩定，顯示具油袋之滑塊配合潤滑油之使用可有效降低滑動摩擦。

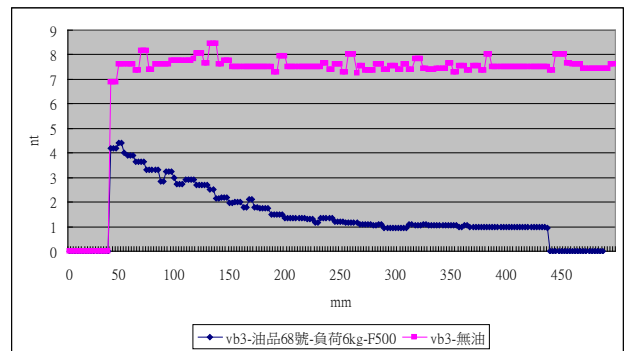


圖 8：vb3 滑塊在無潤滑與在使用 68 號潤滑油條件下負載 6kg 及速度 500mm/min 之滑動摩擦力比較

3.1 不同速度下表面紋理對摩擦力的影響

為比較不同運動速度對於滑動摩擦之影響，圖 9 顯示各滑塊在相同 6Kg 負載的條件下滑動速度由 500mm/min 變化至 3500mm/min 時，無潤滑油之乾摩擦與使用 32 號潤滑油之滑動摩擦係數之影響。圖 9(a) 顯示乾摩擦之摩擦係數幾乎為定值，與油袋

紋理無關，此與庫倫摩擦理論相符。然而在使用潤滑油的狀況下，滑動摩擦係數則不僅受滑動速度影響，亦受到油袋紋理配置之影響，如圖 9(b)所示，大體而言，滑動速度愈快摩擦係數愈大，而各種油袋紋理配置中，又以 vb5 滑塊的紋理所表現的摩擦性能最差，其它各滑塊之滑動摩擦明顯較乾摩擦降低甚多。

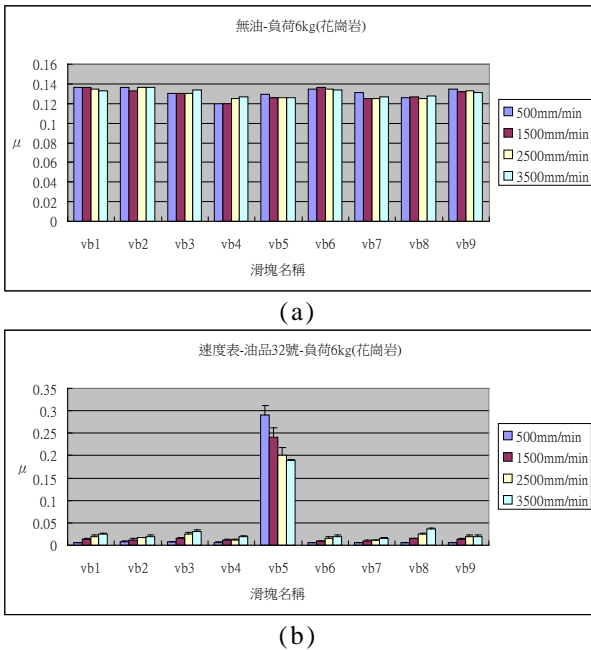


圖 9：於負載 6kg 下，各滑塊於不同速度時之摩擦係數(a)無潤滑之乾摩擦與(b)使用 32 號潤滑油之摩擦

進一步比較具不同紋理之滑塊摩擦對速度之變化，如圖 10 所示為各滑塊在使用 32 號潤滑油與負載 6kg 時，不同運動速度條件下之摩擦係數比較，圖中顯示，各滑塊之摩擦係數大致隨滑動速度提高而增加，僅有滑塊 vb7 在速度 2500mm/min 時摩擦反而下降，原因尚待進一步探討。

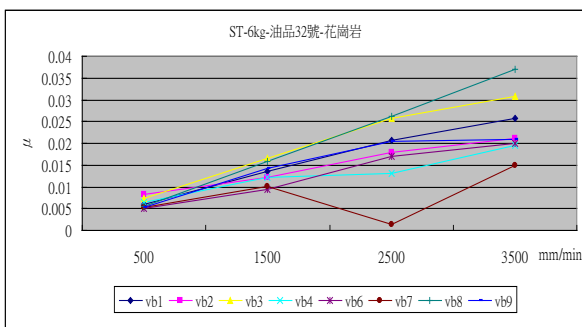


圖 10：各滑塊在使用 32 號潤滑油與負載 6kg 時，不同運動速度條件下之摩擦係數比較

3.2 不同負載下表面紋理對摩擦力的影響

本研究另一重點在於分析不同負載下表面紋理對摩擦力的影響，圖 10 所示為在相同速度 3500mm/min 與使用 32 號潤滑油的條件下，變動負載條件為 6kg、12kg 與 16kg 量測各滑塊於不同負載時對於摩擦力的影響。

圖中顯示，大部分滑塊的滑動摩擦係數隨著負載增加而變小，其變化也愈趨近平穩，估計可能的原因為在較高負載時，滑塊與滑動面間的間隙變小，油袋所含的油較不易洩出，潤滑效果比較小而且穩定。

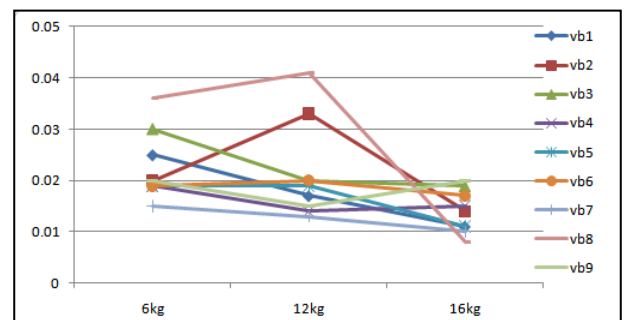


圖 11：各滑塊在使用 32 號潤滑油與運動速度 3500mm/min 時，不同負載條件下之摩擦係數

4. 較佳紋理配置與驗證

本研究匯整理前節實驗所得之實驗數據，進一步以迴歸分析法分析各種使用條件下較佳之油袋紋理組合，再進一步由此 36 種較佳組合中，選擇四個出現較頻繁之組合，進一步根據所選出之油袋紋理組合配置加工此四滑塊進行驗證實驗，以驗證其正確性。

4.1 變異數分析

變異數分析主要目的是評估實驗誤差，同時判斷各控制因子之貢獻率，透過分析本研究設計 9 塊滑塊之紋理配合 36 種使用條件之實驗數據，可逐一分析在各種使用條件下各控制因子之貢獻率。因限於篇幅，本文僅舉一例說明。

圖 12 所示為使用 150 號潤滑油，在 2500mm/min 的滑動速度與負載 12kg 的狀況下，滑塊控制因子之貢獻度分析結果，以該使用條件而言，各因子的貢獻度依序為深度、POP、運動方向與 PPI，顯示在本研究的使用條件下，深度與 POP 對於滑塊之滑動摩擦有較大的影響，選用時需特別注意。