

螺帽成型機構設計改良與分析

歐峯銘* 顏澹寧

國立成功大學 機械工程學系 *ou_fm@gs.ncku.edu.tw

摘要

想要增加肘節以提升效率

本研究基於現有螺帽成型之曲柄滑塊機構，提出一種六連桿機構的改良設計，目標為在維持少量設計變更的前提下，提升沖壓過程的運動性能並減少非必要能耗。改良設計透過增加額外連桿與固定軸樞，使運動更平穩，並顯著提升沖壓過程中的停留、速度與加速度表現。研究結果顯示，輸入桿有效角位移在運轉週期中由原先的 9.6% 提升至 27.5%，且機械利益在沖壓起始點提高 36.3%，整體均優於現有設計。受力分析顯示，改良設計在驅動力矩與搖撼力上亦優於原設計，但搖撼力矩結果顯示桿件性質參數需要進一步優化。本研究提供業者後續優化與設計改善的基礎與方法，有助於協助國內扣件產業技術升級。

關鍵詞：螺帽成型、曲柄滑塊機構、六連桿機構、運動分析、機械利益、受力分析
kinematics dynamic

1. 前言

隨著機械製造業的進步與自動化技術水準的提升，金屬成型工藝在現代製造中扮演關鍵角色，其中螺帽零件在如汽車、電子等各產業的應用非常普遍與廣泛，因此螺帽成型機的設計與性能優化一直是提升效率與品質的重要課題；此外，近年來全球對於永續議題的關注更甚以往，致使如何降低工作機械不必要的能源消耗，也是設計過程中的重要考量因素之一。

傳統機械沖壓機械較常使用是單自由度的連桿機構，最基本構型為四連桿之曲柄滑塊機構，其在輸入軸會配置飛輪，飛輪在空行程期間累積能量，在成型過程中釋放儲存的能量，並藉此降低馬達的速度波動。關於沖壓機構設計的相關研究，文獻[1]提出兩型八連桿機構應用於沖床之設計，並與其它不同連桿設計進行機械利益分析比較，展示其八連桿設計具有較佳表現；文獻[2]進一步將八連桿機構透過滾子與滑槽的設計，讓輸入桿的長度可隨不同需求進行調整；文獻[3]則是以機械利益為設計目標，提出六桿 Stephenson 機構構型的設計。另外，為能提升成型工作彈性與效能，亦有不少研究著重於利用伺服驅動技術，搭配不同的多自由度機構，提供沖壓的靈活性與滿足不同需求，文獻[4-8]主要採用兩個自由度的不同接頭配置之七連桿機構，利用一個定速與一個變速的混合驅動控制方式，探討不同機構之最佳沖壓性能相關設計研究；文獻[9,10]則是針對九連桿機構進行沖壓應用分析研究；除了連桿機構外，更有結合應用凸輪機構[11]、行星輪系[12]、並聯與螺桿傳動[13]等不同類型伺服機構的設計被提出。儘管不少研究試圖通過引入複雜機構或進階伺服控制技術來改善沖壓機構的性能；然而，這些方法雖然可以增強沖壓過程的靈活性和控制精度，但也帶來了設計、製造和維護上的複雜性與高成本，昂貴的伺服控制系統和複雜的機構設計也致使相關技術較難以普及化；此外，過度複雜的機構也可能增加設備的故障風險和維護需求，進而影響到生產連續性及穩定性。因此，對於成本和效率要求較高的國內中小型企業而言，如何在保持設備結構簡單且低成本的前提下進行設計改良，成為本研究的主要動機。

為此，本文旨在基於現有螺帽成型四連桿曲柄滑塊機構的設計，考量整體空間與最少變更之限制條件，嘗試額外增加兩個桿件將其改為六連桿機構，透過運動與受力分析模型的建立，探討改良後機構的性能表現，期能以此改良方法提供業者做為後續優化與設計改善之參考。全文架構安排如下，首先介紹研究背景與現有設計，接著，根據六桿運動鏈合成決定改

良構型並訂定尺寸，推導其運動分析與受力分析模型，進一步比較探討四連桿與六連桿分析結果，最後則為結論與建議。

2. 現有設計

圖 1 所示與表 1 所列為現有四連桿曲柄滑塊機構設計與參數定義，主要參考現有產品型錄[14]規格換算取得，馬達輸入驅動為定轉速 60 rpm，滑塊總行程為 200 mm，螺帽實際沖壓行程為 20 mm。根據圖 1 可得如式(1)之向量迴路方程式，進而解得各桿件之位置、速度、以及加速度；繪製各桿件受力自由體圖，如圖 2 所示，列出並聯立各桿件的力與力矩平衡方程式，便可求得各接頭作用力，詳細求解過程可參考文獻[15]，分析結果將在後續章節與改良設計一併呈現與探討。

$$\vec{R}_1 - \vec{R}_2 + \vec{R}_3 = 0 \quad (1)$$

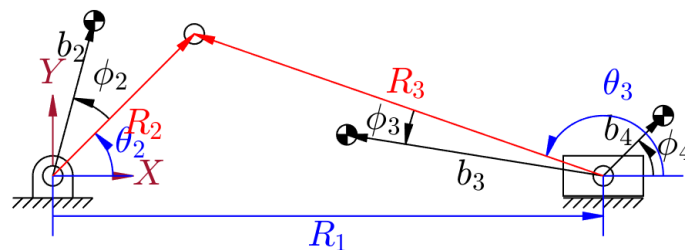


圖 1 現有設計曲柄滑塊機構示意

表 1 圖 1 之現有設計曲柄滑塊機構參數

	質量 m (kg)	轉動慣量 I (kg · mm ²)	質心長度 b (mm)	質心方位角 ϕ (°)
桿 2 ($R_2=100$ mm)	18.8669	51131.2	22.2531	0
桿 3 ($R_3=640$ mm)	61.2959	2050416	320	0
桿 4	168.784	2480321	0	0

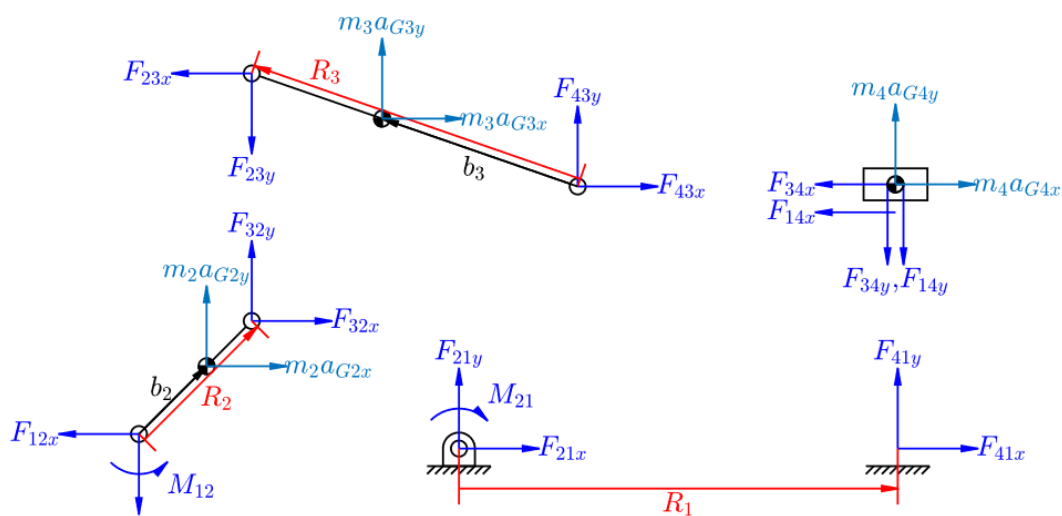


圖 2 曲柄滑塊機構受力自由體圖

3. 改良設計

單自由度的六連桿機構運動鏈可分為 Stephenson 鏈及 Watt 鏈[15]，兩者皆具有兩個三接頭桿，由於本研究需維持現有四連桿設計並考量整體空間、製造組裝、最少變更等條件限制，將運動鏈限定為僅維持一個三接頭桿且為固定桿，如此兩種運動鏈皆會轉換成如圖 3 所示具一個複接頭的運動鏈，再依此運動鏈繪製機構簡圖，便可得如圖 4 之改良機構構型。

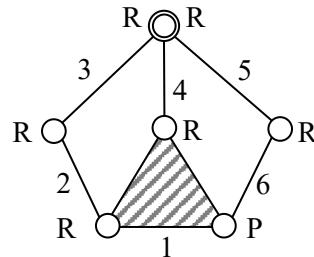


圖 3 改良設計採用之運動鏈

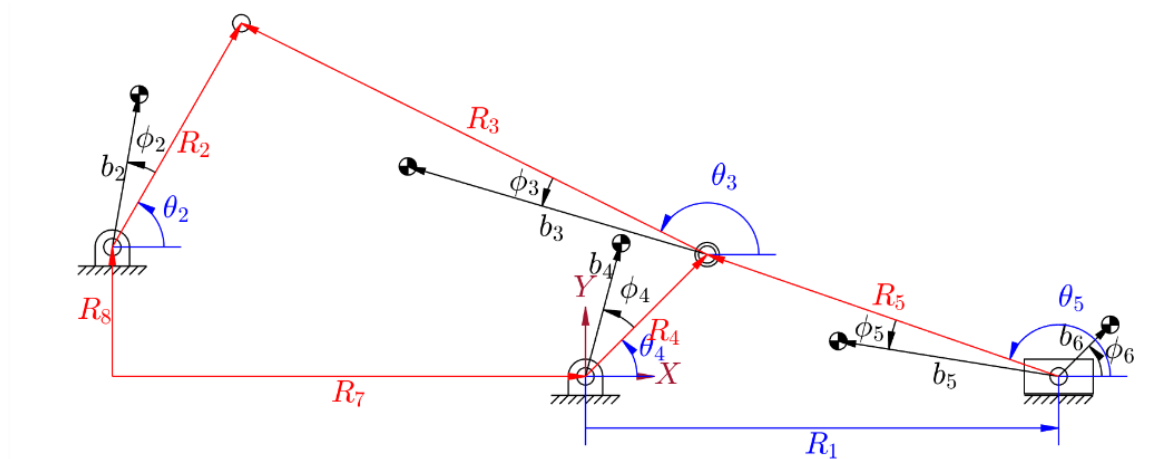


圖 4 改良設計六桿機構示意

由於保留原有四桿機構之設計，故圖 4 之桿 4、桿 5、以及桿 6 之相關設計參數需等於表 1 所列之桿 2、桿 3、以及桿 4 之參數，且透過現有設計之位置分析可知，滑塊實際沖壓過程 (20 mm)，輸入桿的角位移為 34.41° ，佔整體周期總位移僅約 9.6%。為避免增加過多占地面積並確保傳力效果，以及提升有效沖壓時間與減少無沖壓時間之能耗，將改良設計之兩固定轉軸水平距離 R_7 設定為 120 mm、垂直距離 R_8 為 800 mm、輸入桿長 R_2 (需為最短桿) 為 50 mm，而且滑塊在右極限位置時，桿 3 與桿 4 夾角(傳力角)需為 75° ，可得桿 3 長度 R_3 為 779.7 mm；依此幾何參數可求得改良設計輸入桿在沖壓過程之角位移為 98.84° ，佔整體週期約 27.5%，優於現有設計；最後，參考現有設計規格訂定改良設計參數如表 2 所列。

表 2 圖 4 之改良設計六桿機構參數

	質量 m (kg)	轉動慣量 I ($\text{kg} \cdot \text{mm}^2$)	質心長度 b (mm)	質心方位角 ϕ ($^\circ$)
桿 2	15.1311	23793.9	5.44597	0
桿 3	73.9313	3546588	389.849	0
桿 4	18.8669	51131.2	22.2531	0
桿 5	61.2959	2050416	320	0
桿 6	168.784	2480321	0	0

4. 運動分析

4.1 位置、速度、加速度分析

根據圖 4 定義之向量，可列出兩個向量迴路方程式，如式(2)與式(3)，聯立其 X 軸與 Y 軸之分量方程式，如式(4)，便可求得一個運轉週期裡各桿件的位置；將式(4)對時間進行一次與二次微分，分別可得如式(5)與式(6)之速度與加速度方程式，輸入為定轉速 60 rpm，可求得各個桿件運轉周期間的速度與加速度。

$$\vec{R}_2 - \vec{R}_3 - \vec{R}_4 - \vec{R}_7 + \vec{R}_8 = 0 \quad (2)$$

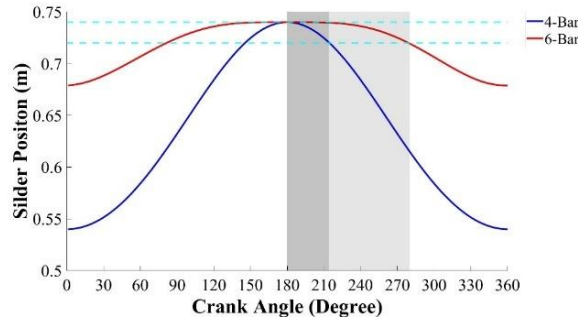
$$\vec{R}_1 - \vec{R}_4 + \vec{R}_5 = 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} R_2 \cos \theta_2 - R_3 \cos \theta_3 - R_4 \cos \theta_4 - R_7 = 0 \\ R_2 \sin \theta_2 - R_3 \sin \theta_3 - R_4 \sin \theta_4 + R_8 = 0 \\ R_1 - R_4 \cos \theta_4 + R_5 \cos \theta_5 = 0 \\ -R_4 \sin \theta_4 + R_5 \sin \theta_5 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

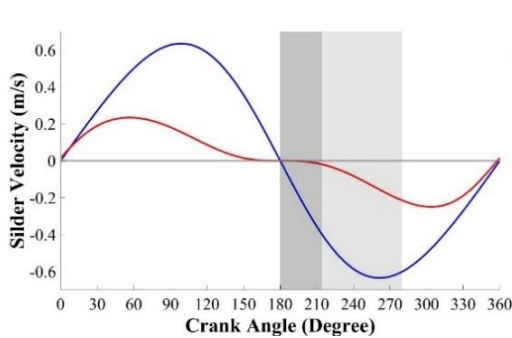
$$\begin{cases} R_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - R_3 \dot{\theta}_3 \sin \theta_3 - R_4 \dot{\theta}_4 \sin \theta_4 = 0 \\ R_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 - R_3 \dot{\theta}_3 \cos \theta_3 - R_4 \dot{\theta}_4 \cos \theta_4 = 0 \\ \dot{R}_1 + R_4 \dot{\theta}_4 \sin \theta_4 - R_5 \dot{\theta}_5 \sin \theta_5 = 0 \\ -R_4 \dot{\theta}_4 \cos \theta_4 + R_5 \dot{\theta}_5 \cos \theta_5 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} R_2 (\dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 + \ddot{\theta}_2 \sin \theta_2) - R_3 (\dot{\theta}_3^2 \cos \theta_3 + \ddot{\theta}_3 \sin \theta_3) - R_4 (\dot{\theta}_4^2 \cos \theta_4 + \ddot{\theta}_4 \sin \theta_4) = 0 \\ R_2 (\dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 - \ddot{\theta}_2 \cos \theta_2) - R_3 (\dot{\theta}_3^2 \sin \theta_3 - \ddot{\theta}_3 \cos \theta_3) - R_4 (\dot{\theta}_4^2 \sin \theta_4 - \ddot{\theta}_4 \cos \theta_4) = 0 \\ \ddot{R}_1 + R_4 (\dot{\theta}_4^2 \cos \theta_4 + \ddot{\theta}_4 \sin \theta_4) - R_5 (\dot{\theta}_5^2 \cos \theta_5 + \ddot{\theta}_5 \sin \theta_5) = 0 \\ R_4 (\dot{\theta}_4^2 \sin \theta_4 - \ddot{\theta}_4 \cos \theta_4) - R_5 (\dot{\theta}_5^2 \sin \theta_5 - \ddot{\theta}_5 \cos \theta_5) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

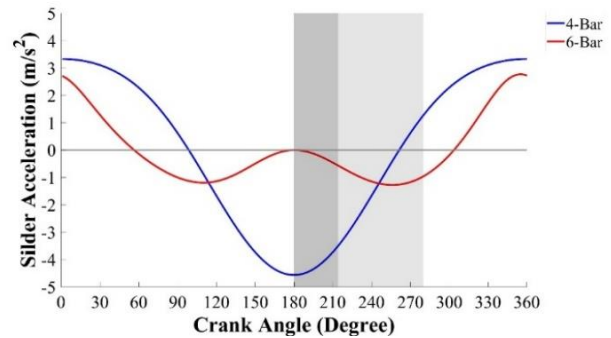
圖 5 所示為改良設計與原始設計的分析結果比較，圖中深灰色與淺灰色區域分別為原始設計與改良設計之有效沖壓區間，結果顯示改良設計之急回(quick return)特性，使沖壓過程中滑塊的位置、速度、加速度曲線皆更為平穩，具有更好的停留與運動特性。



(a) 位置分析



(b) 速度分析



(c) 加速度分析

圖 5 運動分析結果比較

4.2 機械利益分析

根據文獻[1]，機械利益 MA (Mechanical Advantage)可由式(7)求得，其中 S 為滑塊總行程 (200 mm)， $dR_1/d\theta_2$ 為滑塊之運動係數(滑塊位置對輸入角度之微分)，可透過向量迴路方程式(1)-(3)推導求得。圖 6 所示為在實際沖壓過程中，改良設計與原始設計之機械利益分析結果，因極限位置之 MA 為無限大，圖中設定 20 為上限進行比較，結果顯示改良設計之機械利益表現呈現穩定變化且均優於現有設計，比較兩者於沖壓起始點之機械利益，改良設計值 4.32 較原始設計值 3.17 提升約 36.3%。

$$MA = \frac{S}{dR_1/d\theta_2} \quad (7)$$

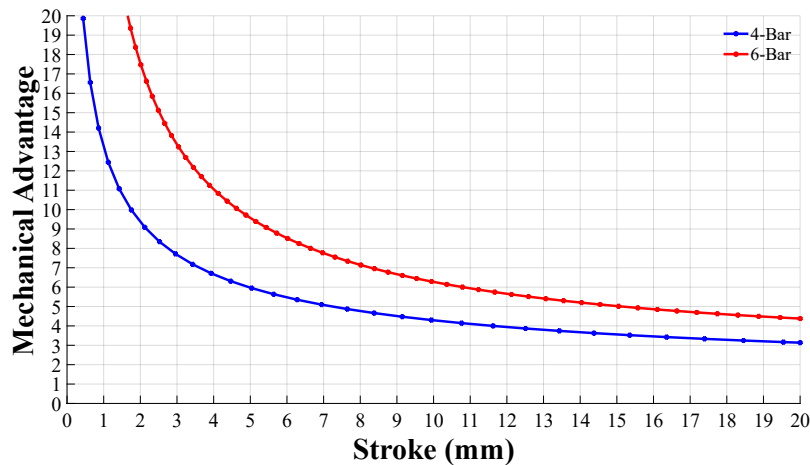


圖 6 機械利益分析結果比較

5. 受力分析

完成運動分析後，繪製改良設計各桿件之受力自由體圖，如圖 7 所示，由於本文主要比較改良前後之受力變化與趨勢，假設不考慮重力、摩擦力、負載條件下，列出各桿件之力與力矩平衡方程式，如式(8)，將其聯立整理如式(9)之矩陣型式，便可求解所有受力未知數，進一步進行驅動力矩、搖撼力、以及搖撼力矩之分析。

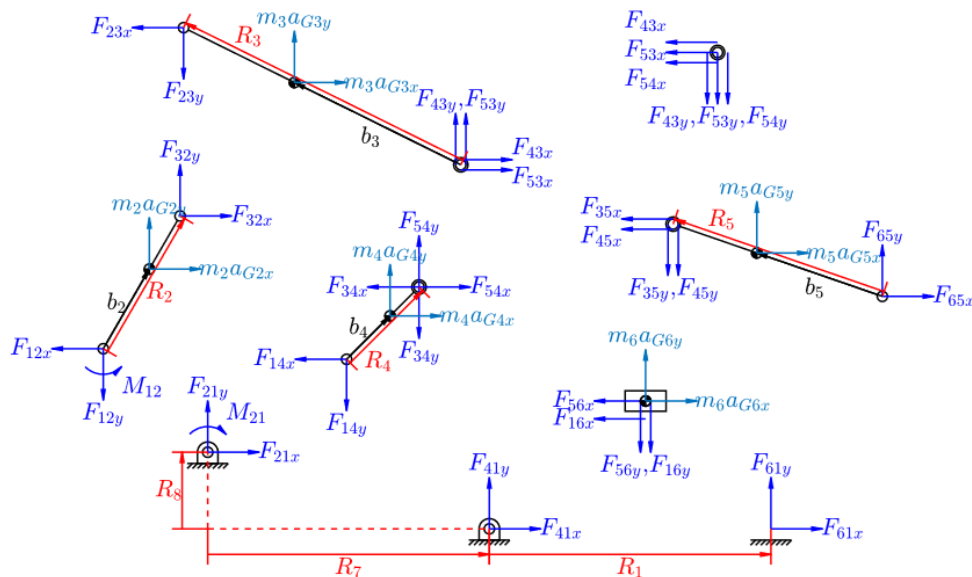


圖 7 改良機構受力自由體圖

$$\begin{cases}
 F_{32x} - F_{12x} = m_2 a_{G2x} \\
 F_{32y} - F_{12y} = m_2 a_{G2y} \\
 F_{32x} L_{R_2,32x} + M_{12} + F_{32y} L_{R_2,32y} = 0 \\
 F_{43x} - F_{23x} + F_{53x} = m_3 a_{G3x} \\
 F_{43y} - F_{23y} + F_{53y} = m_3 a_{G3y} \\
 F_{23x} L_{R_3,23x} + F_{23y} L_{R_3,23y} + F_{43x} L_{R_3,43x} + F_{43y} L_{R_3,43y} + F_{53x} L_{R_3,53x} + F_{53y} L_{R_3,53y} = I_3 \ddot{\theta}_3 \\
 F_{54x} - F_{34x} - F_{14x} = m_4 a_{G4x} \\
 F_{54y} - F_{34y} - F_{14y} = m_4 a_{G4y} \\
 F_{34x} L_{R_4,34x} + F_{34y} L_{R_4,34y} + F_{54x} L_{R_4,54x} + F_{54y} L_{R_4,54y} = (m_4 b_4^2 + I_4) \ddot{\theta}_4 \\
 F_{65x} - F_{45x} - F_{35x} = m_5 a_{G5x} \\
 F_{65y} - F_{45y} - F_{35y} = m_5 a_{G5y} \\
 F_{35x} L_{R_5,35x} + F_{35y} L_{R_5,35y} + F_{45x} L_{R_5,45x} + F_{45y} L_{R_5,45y} + F_{65x} L_{R_5,65x} + F_{65y} L_{R_5,65y} = I_5 \ddot{\theta}_5 \\
 F_{43x} + F_{53x} + F_{54x} = 0 \\
 F_{43y} + F_{53y} + F_{54y} = 0 \\
 -F_{56x} = m_6 a_{G6x} \\
 -F_{16y} - F_{56y} = m_6 a_{G6y}
 \end{cases} \quad (8)$$

其中 $L_{R_2,32x} = -R_2 \sin \theta_2$ 、 $L_{R_2,32y} = R_2 \cos \theta_2$ 、 $L_{R_3,23x} = R_3 \sin \theta_3 - b_3 \sin \theta_3$ 、 $L_{R_3,23y} = b_3 \cos \theta_3 - R_3 \cos \theta_3$ 、 $L_{R_3,43x} = L_{R_3,53x} = b_3 \sin \theta_3$ 、 $L_{R_3,43y} = L_{R_3,53y} = -b_3 \cos \theta_3$ 、 $L_{R_4,34x} = R_4 \sin \theta_4$ 、 $L_{R_4,34y} = -R_4 \cos \theta_4$ 、 $L_{R_4,54x} = -R_4 \sin \theta_4$ 、 $L_{R_4,54y} = R_4 \cos \theta_4$ 、 $L_{R_5,35x} = L_{R_5,45x} = R_5 \sin \theta_5 - b_5 \sin \theta_5$ 、 $L_{R_5,35y} = L_{R_5,45y} = b_5 \cos \theta_5 - R_5 \cos \theta_5$ 、 $L_{R_5,65x} = b_5 \sin \theta_5$ 、以及 $L_{R_5,65y} = -b_5 \cos \theta_5$ 。

$$\begin{bmatrix}
 -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{R_2,32x} & L_{R_2,32y} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{R_3,23x} & L_{R_3,23y} & L_{R_3,43x} & L_{R_3,43y} & L_{R_3,53x} & L_{R_3,53y} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{R_4,34x} & L_{R_4,34y} & 0 & 0 & L_{R_4,54x} & L_{R_4,54y} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{R_5,35x} & L_{R_5,35y} & L_{R_5,45x} & L_{R_5,45y} & L_{R_5,65x} & L_{R_5,65y} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 F_{12x} \\
 F_{12y} \\
 F_{14x} \\
 F_{14y} \\
 F_{16y} \\
 F_{23x} \\
 F_{23y} \\
 F_{34x} \\
 F_{34y} \\
 F_{35x} \\
 F_{35y} \\
 F_{45x} \\
 F_{45y} \\
 F_{56x} \\
 F_{56y} \\
 M_{12}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 m_2 a_{G2x} \\
 m_2 a_{G2y} \\
 0 \\
 m_3 a_{G3x} \\
 m_3 a_{G3y} \\
 I_3 \ddot{\theta}_3 \\
 m_4 a_{G4x} \\
 m_4 a_{G4y} \\
 (m_4 b_4^2 + I_4) \ddot{\theta}_4 \\
 m_5 a_{G5x} \\
 m_5 a_{G5y} \\
 I_5 \ddot{\theta}_5 \\
 0 \\
 0 \\
 m_6 a_{G6x} \\
 m_6 a_{G6y}
 \end{bmatrix} \quad (9)$$

5.1 驅動力矩分析

圖 8 所示為改良設計與現有設計的驅動力矩分析結果比較圖，結果顯示整個運作週期過程，改良設計之驅動力矩相較於原始設計皆較小且呈現平穩變化、波動小，代表對於馬達能力要求較低，有機會降低馬達成本。

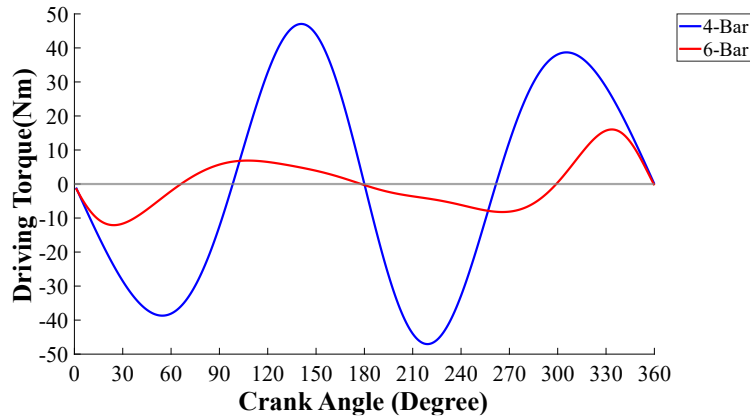
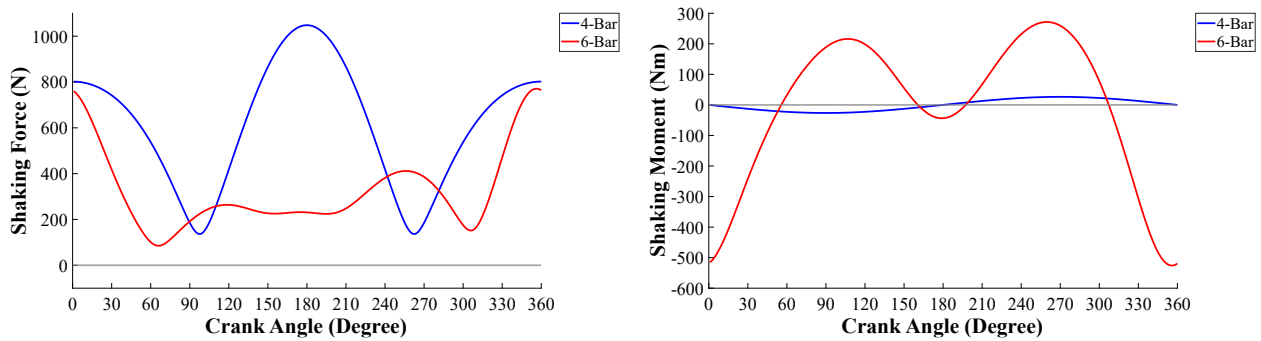


圖 8 驅動力矩分析結果比較

5.1 搖撼力與搖撼力矩分析

求得各接頭作用力後，便可計算施予固定桿的合力與與合力矩，即搖撼力與搖撼力矩，計算結果如圖 9 所示，結果顯示，雖然改良設計之搖撼力表現較現有設計平穩，但搖撼力矩則明顯劣於現有設計，較易產生搖動或振動影響機器運轉品質，因此若採用此設計，需要針對各桿件(尤其是增設桿件)質量與轉動慣量、以及搭配飛輪，進行調整與優化來改善搖撼力矩。



(a) 搖撼力

(b) 搖撼力矩

圖 9 搖撼力與搖撼力矩分析結果比較

6. 結論

本研究以一個現有螺帽成型機構為基礎，考量較少設計變更與減少非必要能耗為目標，提出一種基於現有曲柄滑塊設計之六桿改良機構，透過增設額外的連桿與固定軸樞，改良設計提供更平穩的運動性能，使得沖壓過程具有良好的停留、速度、以及加速度表現，結果顯示，輸入桿有效角位移佔運轉週期從原始 9.6% 提升至 27.5%，機械利益也均優於現有設計，例如在沖壓起始點提升了 36.3%。在受力分析方面，由於增設桿件的性質參數是參考現有設計擬定，改良設計雖在驅動力矩與搖撼力表現優於現有設計，但搖撼力矩則表現較差，代表桿件性質參數仍需優化。後續研究課題建議如下：(1)以機械利益、傳力角、輸入角位移為設計目標，定義多目標函數與空間限制條件，利用最佳化方法來決定最佳增設桿件與位置；(2)考量馬達特性，結合順向動力學分析，同步優化各桿件質量與慣量、以及飛輪設計；(3)考量重力、接頭尺寸、摩擦力、負載等影響之綜合分析；(4)進行實際工程設計，實機驗證沖壓性能與能耗表現。

誌謝

本研究得以順利執行，需感謝連翔工業股份有限公司與財團法人金屬工業研究發展中心的協助，特此誌謝。

參考文獻

- [1] Yossifon S and Shivpuri R. Analysis and comparison of selected rotary linkage drives for mechanical presses. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1993; 33: 175–192.
- [2] Soong R-C. A new design method for single DOF mechanical presses with variable speeds and length-adjustable driving links. *Mechanism and Machine Theory*, 2010; 45: 496-510.
- [3] Hu J, Sun Y and Cheng Y. High mechanical advantage design of six-bar Stephenson mechanism for servo mechanical presses. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016; 8(7): 1-12.
- [4] Du R and Guo W-Z. The design of a new metal forming press with controllable mechanism. *Journal of Mechanical Design*, 2003; 125: 82–592.
- [5] Meng C-F, Zhang C, Lu Y-H, et al. Optimal design and control of a novel press with an extra motor. *Mechanism and Machine Theory*, 2004; 39: 11–818.
- [6] Li H and Zhang Y-P. Seven-bar mechanical press with hybrid-driven mechanism for deep drawing; part 1: kinematics analysis and optimum design. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010; 24: 2153–2160.
- [7] Guo W-Z. Dynamic analysis of a hybrid-driven 7-bars mechanism. *Machine Design and Research*, 2007; 23: 23–25.
- [8] Soong R-C. The new hybrid-driven mechanical presses. *Journal of Vibroengineering*, 2014; 16: 945–953.
- [9] Li H, Zhang Y-P and Zheng H-Q. Dynamics modeling and simulation of a new nine-bar press with hybrid-driven mechanism. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2008; 22: 2436–2444.
- [10] Tso P-L and Liang K-C. A nine-bar linkage for mechanical forming presses. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002; 42: 139–145.
- [11] Askarov E, Zhauyt A, Abilkajr Z, et al. New type cam-screw mechanical press. *Proceedings of 16th international scientific conference on Engineering for Rural Development*, 24-26, May 2017, Jelgava, LATVIA: 36-41.
- [12] Soong R-C. On the new mechanical press with a planetary gear train. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2016; 40: 45-58.
- [13] Bai Y, Gao F, Guo W, Yue Y. Kinematic and dynamic analyses of the multi-actuated mechanical press with parallel topology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2012; 226(10): 2573-2588.
- [14] 連翔工業股份有限公司，7 模前托型螺帽成型機，<http://www.lian-shyang.com.tw>。
- [15] 顏鴻森、吳隆庸、黃文敏、吳益彰、藍兆杰，現代機構學，東華書局，台北，2020。