



斜盤式柱塞泵流體流量脈動與滑 靴副油膜特性分析

國立台北科技大學 車輛工程系

陳志鏗教授

台北科技大學 車輛工程系 2021/12/16





大綱

- 01 | 摘要 
- 02 | 斜盤式柱塞泵介紹與PumpLinx軟體介紹
- 03 | 斜盤式柱塞泵模擬與分析
- 04 | 斜盤式柱塞泵模擬與空化分析
- 05 | 斜盤式柱塞泵滑靴副油膜分析
- 06 | 結論



摘要

- 本文將針對**斜盤式柱塞泵**做流體模擬。
- 使用CFD模擬軟體**Pumplinx**來進行斜盤式柱塞泵流體的模擬研究。
- **流量脈動與空化現象**兩種觀察指標中，何種**參數設計**可以達到最穩定的結果。
- 模擬**滑靴副油膜**，泵體內滑靴與斜盤運動時產生潤滑作用而形成的，並建立油膜壓力場與厚度場進行油膜特性分析。



大綱

01 | 摘要

02 | 斜盤式柱塞泵介紹與PumpLinx軟體介紹 

- A. 斜盤式柱塞泵結構與工作原理
- B. 斜盤式柱塞泵排量
- C. 計算流體力學
- D. PumpLinx軟體介紹

03 | 斜盤式柱塞泵模擬與分析

04 | 斜盤式柱塞泵模擬與空化分析

05 | 斜盤式柱塞泵滑靴副油膜分析

06 | 結論



A. 斜盤式柱塞泵結構與工作原理

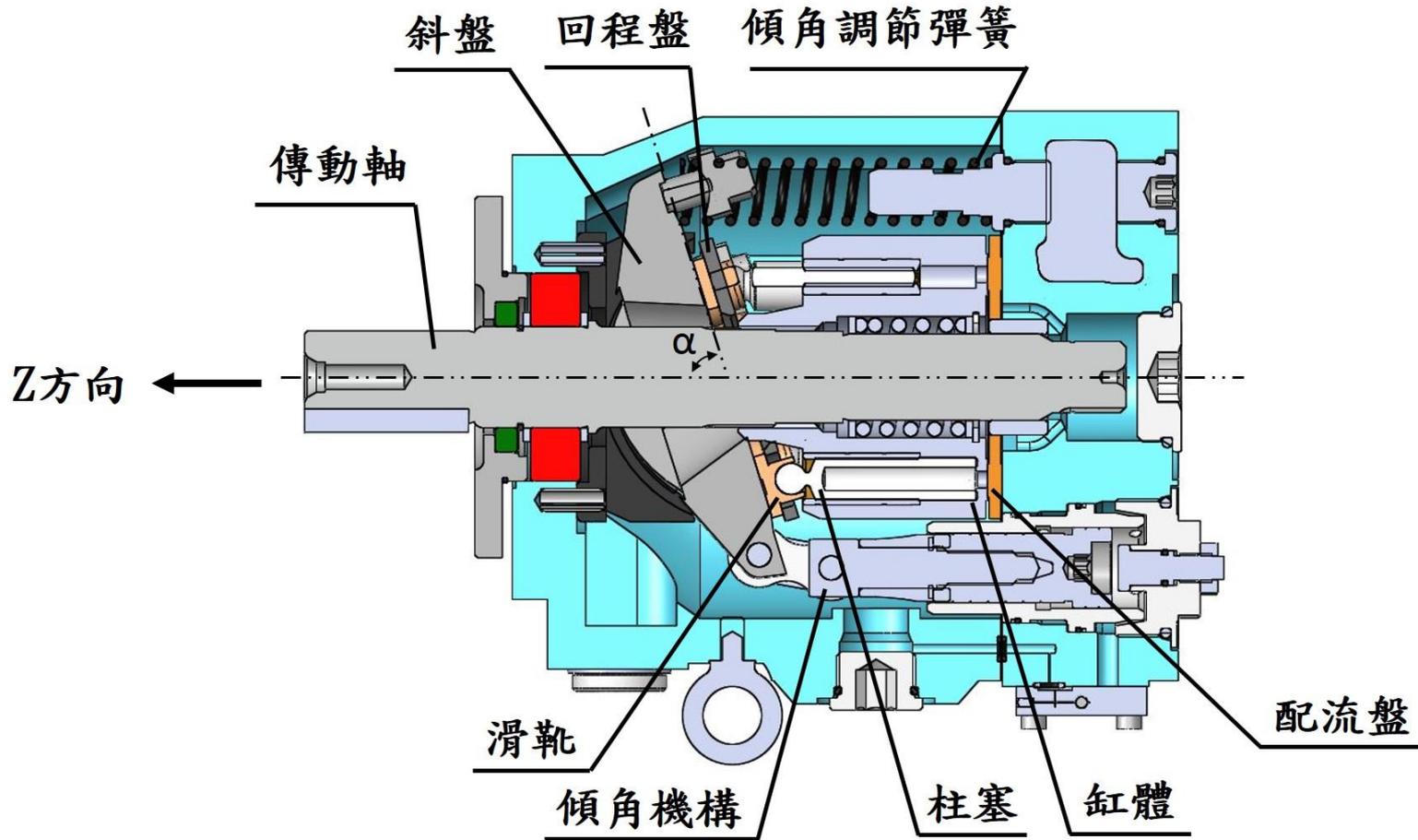


圖2.1 斜盤式柱塞泵結構



A. 斜盤式柱塞泵結構與工作原理

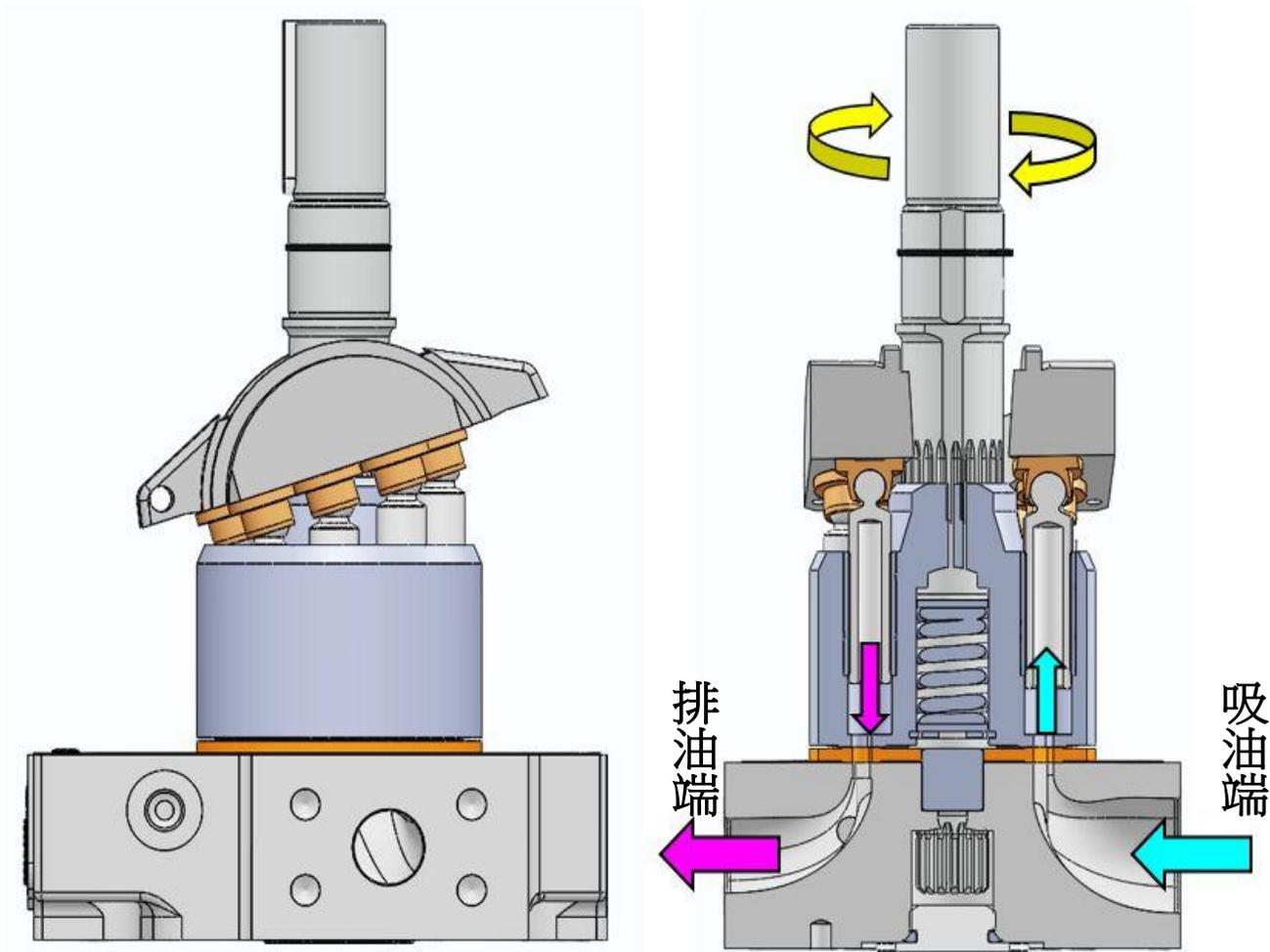
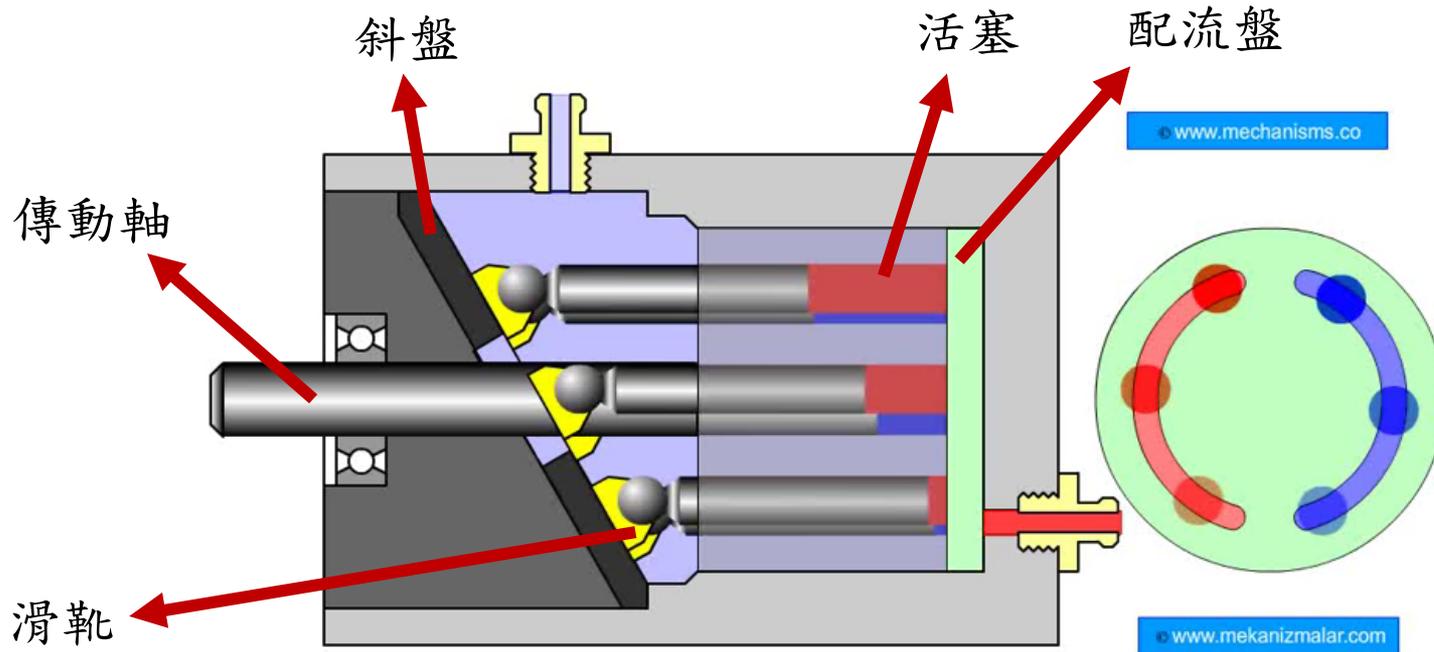


圖2.2 斜盤式柱塞泵吸油與排油方向



A. 斜盤式柱塞泵結構與工作原理

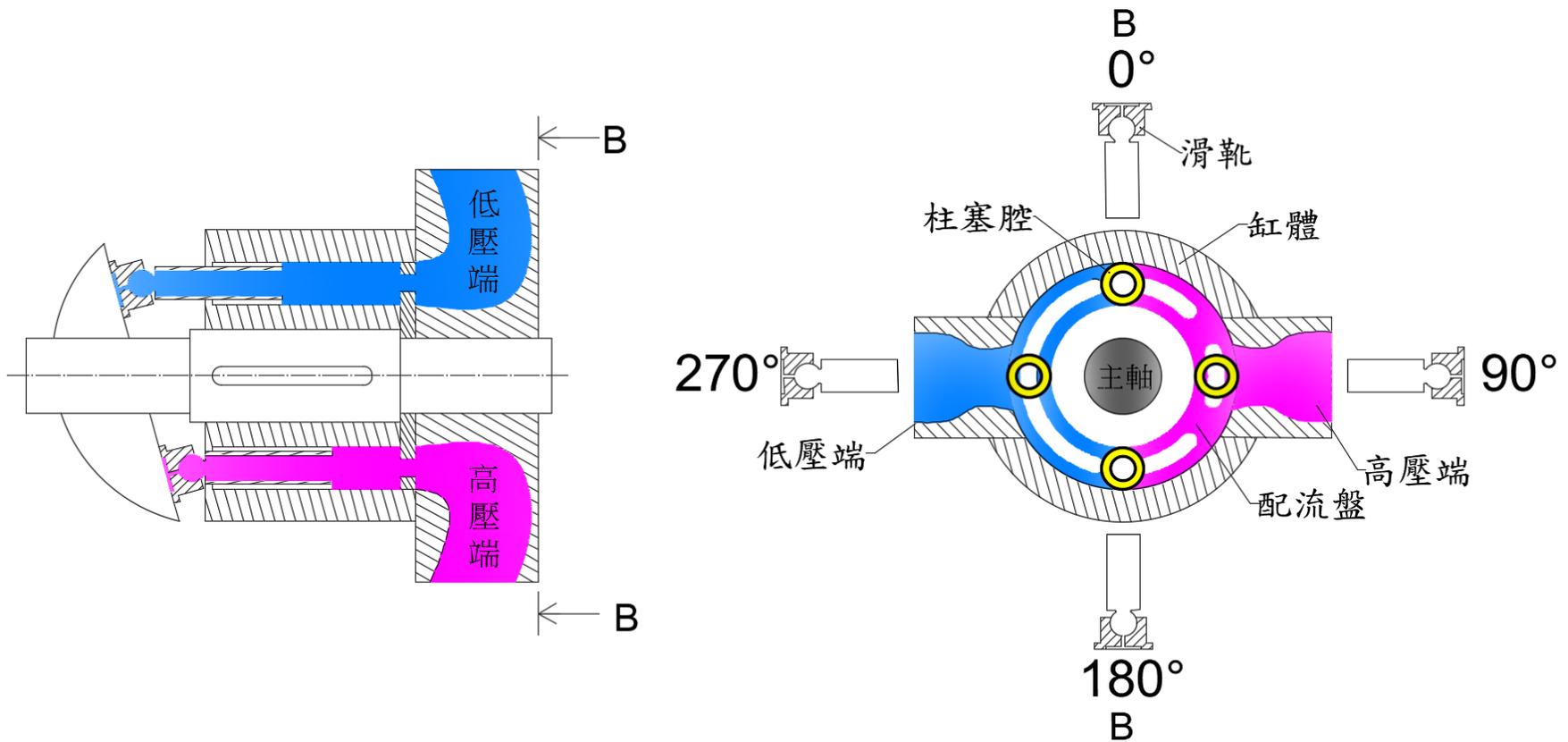


- One Piston
- Two Pistons
- All Pistons
- Stop



A. 斜盤式柱塞泵結構與工作原理

- 泵體與柱塞運轉時的相對位置。





B. 斜盤式柱塞泵排量

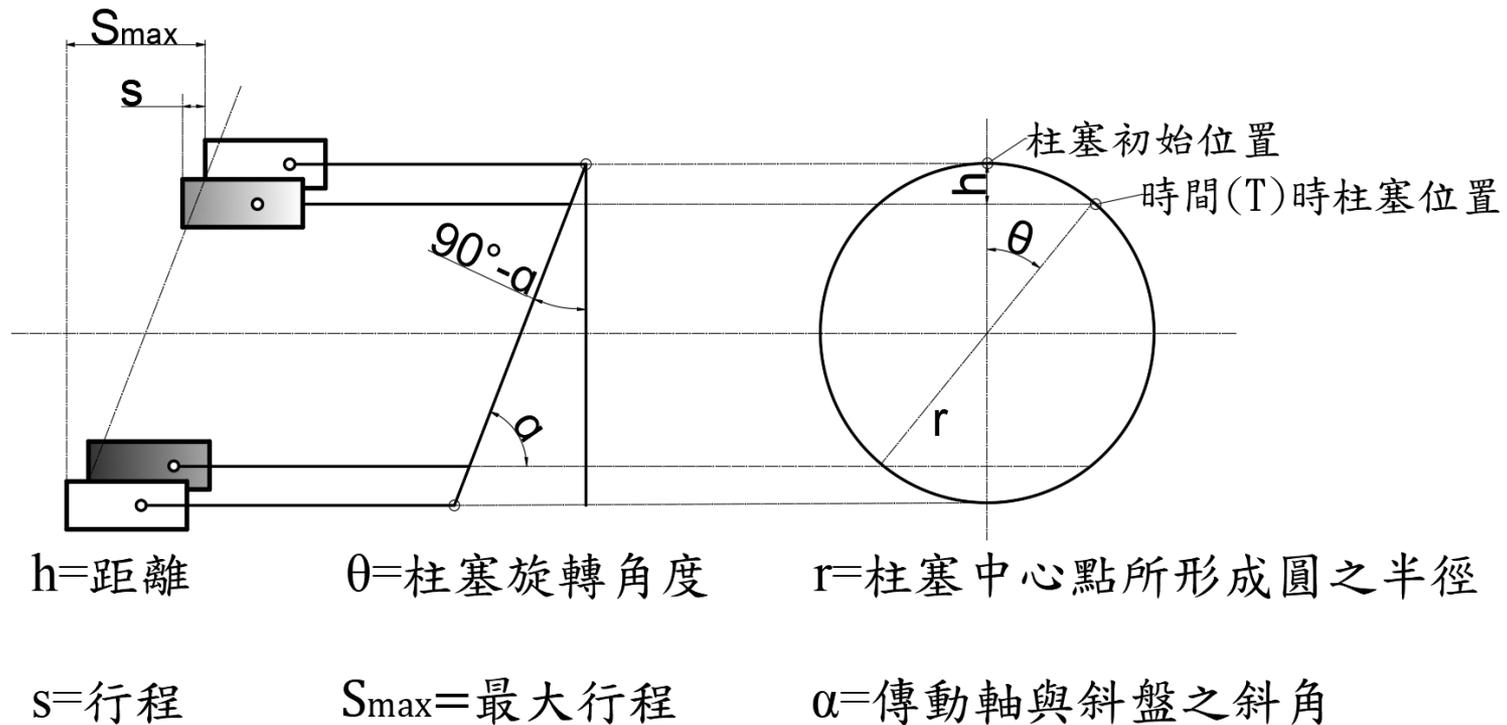


圖2.3 斜盤式柱塞泵作動行程



B. 斜盤式柱塞泵排量

- 此款斜盤式柱塞泵型號為PV046。
- s 為行程： $s = h \tan \alpha = r(1 - \cos \theta) \tan \alpha$
 α ：斜盤與傳動軸之夾角=73°
 r ：柱塞中心點所形成的圓之半徑=35.5mm
- S_{max} 為最大行程，將方程式轉換為： $S_{max} = 2r \tan(90^\circ - \alpha)$
會得到： $S_{max} = 71 * \tan(17^\circ) = 21.3mm$



B. 斜盤式柱塞泵排量

- A_p 為柱塞截面積： $A_p = \pi * r_p^2$

r_p ：柱塞半徑=8.75mm

會得到： $A_p = 3.14 * 8.75^2 = 240.4mm^2$

- Q 為柱塞轉一圈的排量： $Q = 9 * A_p * S_{max}$

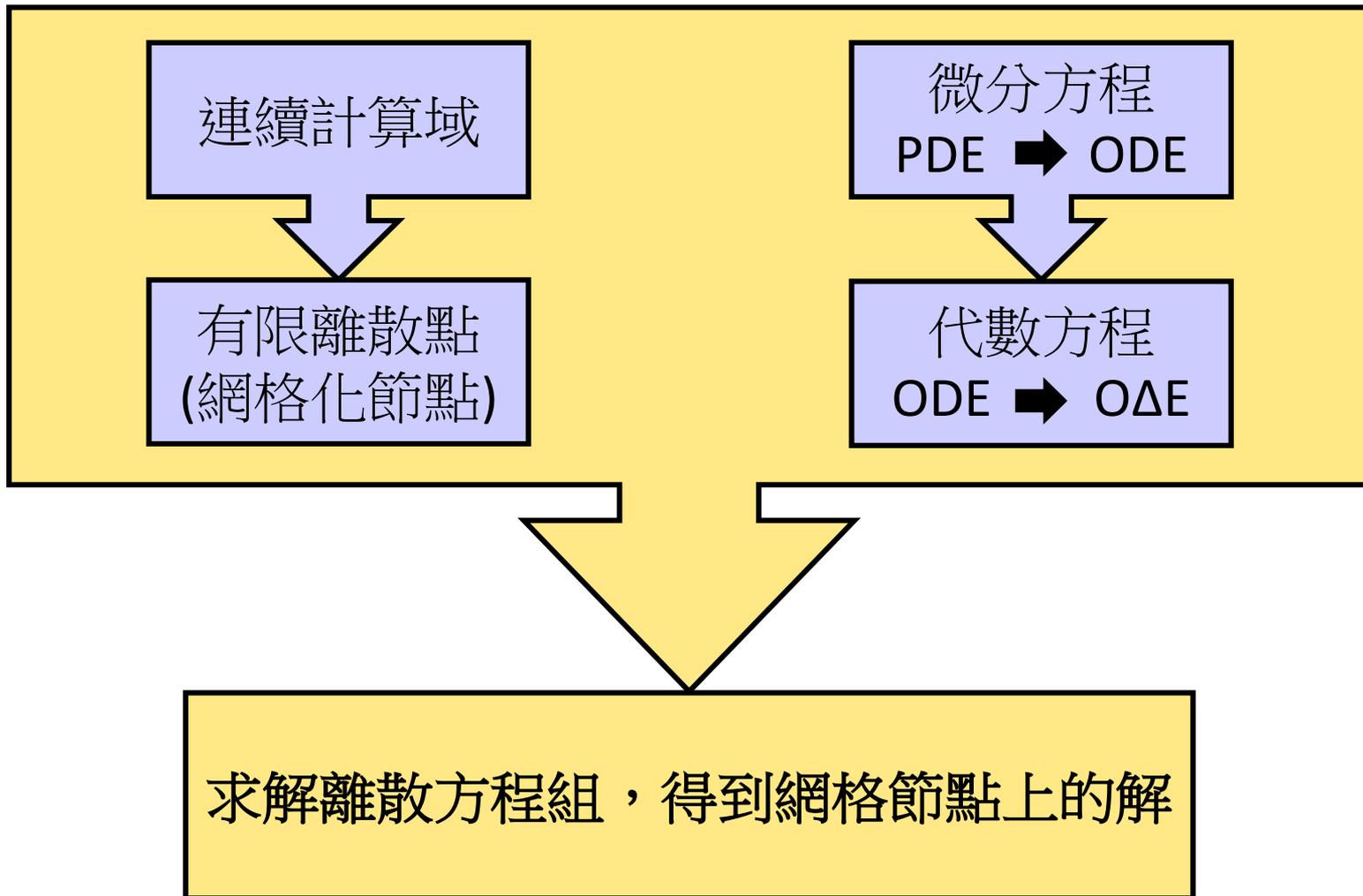
會得到： $Q = 9 * 2.4 * 2.13 = 46.008cm^3$

- 因此此斜盤式柱塞泵之每轉排量為46c. c.。



C. 計算流體力學

- 離散化(Discertisation)，一般來說在運用CFD求解最重要的一個步驟。



C. 計算流體力學

- 有限體積法，有限體積法是在計算流體力學當中常見的一種數值計算方式，有限體積法是屬於積分形式守恆方程式，積分形式的守恆方程式是將計算區域化分為網格，計算網格中定義的控制體積。

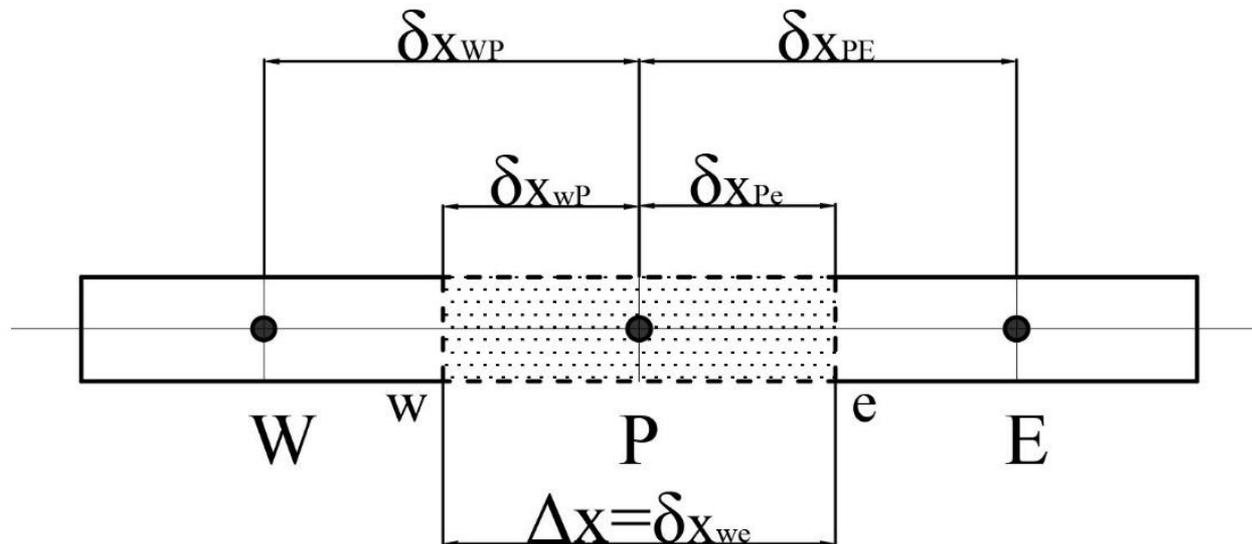
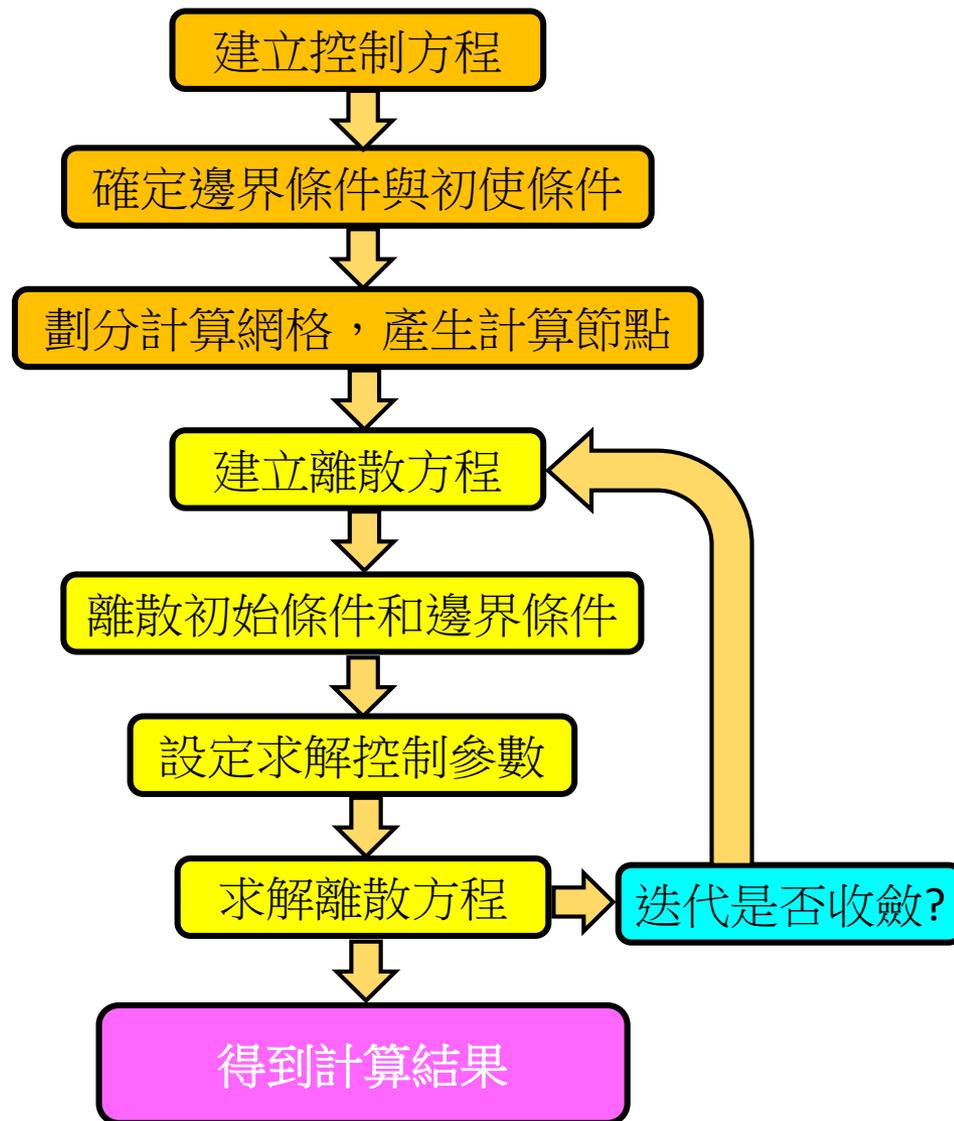


圖2.4 有限體積法的網格化



C. 計算流體力學

- CFD的工作流程。





D. PumpLinx軟體介紹

- 隨著CFD模擬技術的發展，目前市面上開發了許多商業CFD軟體，例如STAR-CD、FLUENT、COMSOL、PumpLinx等，這些商業CFD軟體能提高模擬分析的速度及效率。





D. PumpLinx軟體介紹

- 本文所採用的是Pumplinx，軟體內設置了許多種類型的泵浦模型樣本，包括離心泵浦、齒輪泵浦、柱塞泵浦、滑片泵浦等泵浦模型，使CFD模擬的過程更加容易，效率與模擬的精準度也大幅提升。

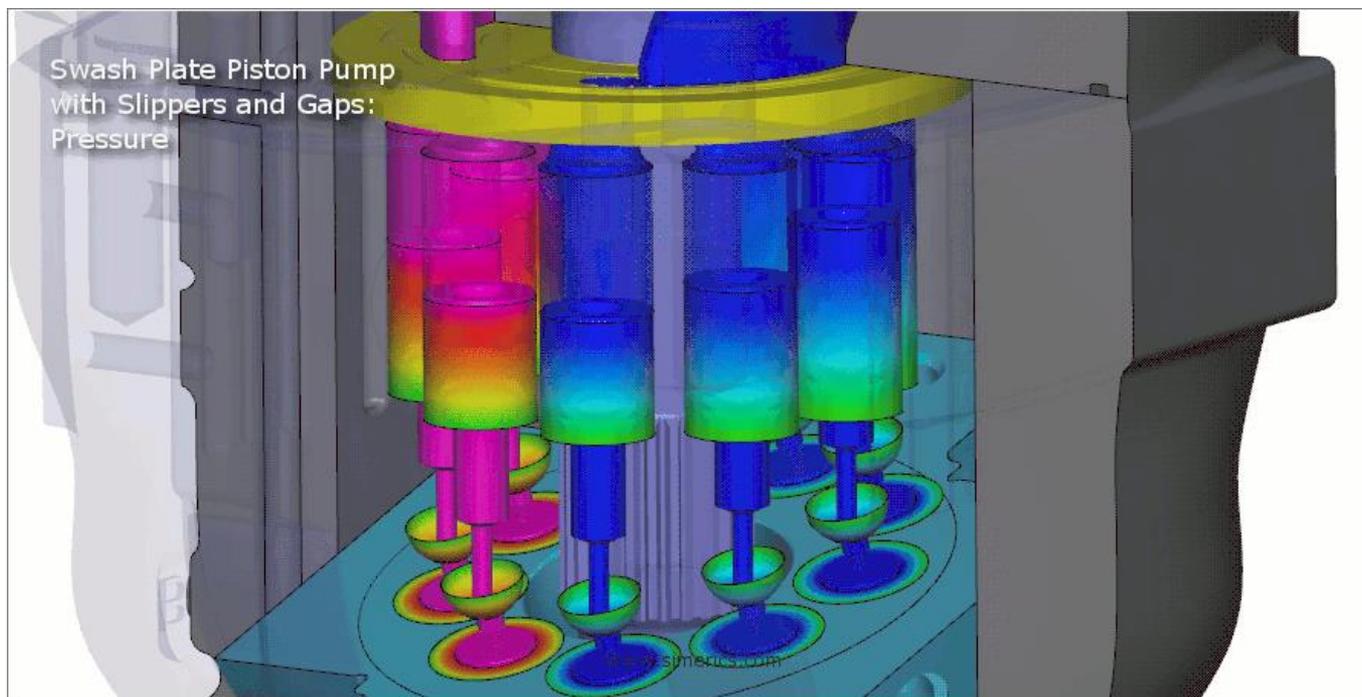


圖2.5 斜盤式柱塞泵流體模擬



大綱

- 01 | 摘要
- 02 | 斜盤式柱塞泵介紹與PumpLinx軟體介紹
- 03 | 斜盤式柱塞泵模擬與分析 
 - A. 研究方法
 - B. 出口端流量脈動
 - C. 配流盤油膜對於流量脈動之影響
- 04 | 斜盤式柱塞泵模擬與空化分析
- 05 | 斜盤式柱塞泵滑靴副油膜分析
- 06 | 結論



A. 研究方法

- 使用PumpLinx軟體分析斜盤式柱塞泵。
- 先在SolidWorks裡繪製三維模型，再取出流體模型，將流體模型匯入PumpLinx裡，並模擬液壓油在斜盤式柱塞泵裡如何流動。
- 此泵有9個柱塞，並設定其入口壓力為1bar、出口壓力為160bar，轉速為1000rpm。此模型將假設沒有內漏、沒有摩擦也沒有效率問題做流體模擬，以理想中的條件做分析。



A. 研究方法

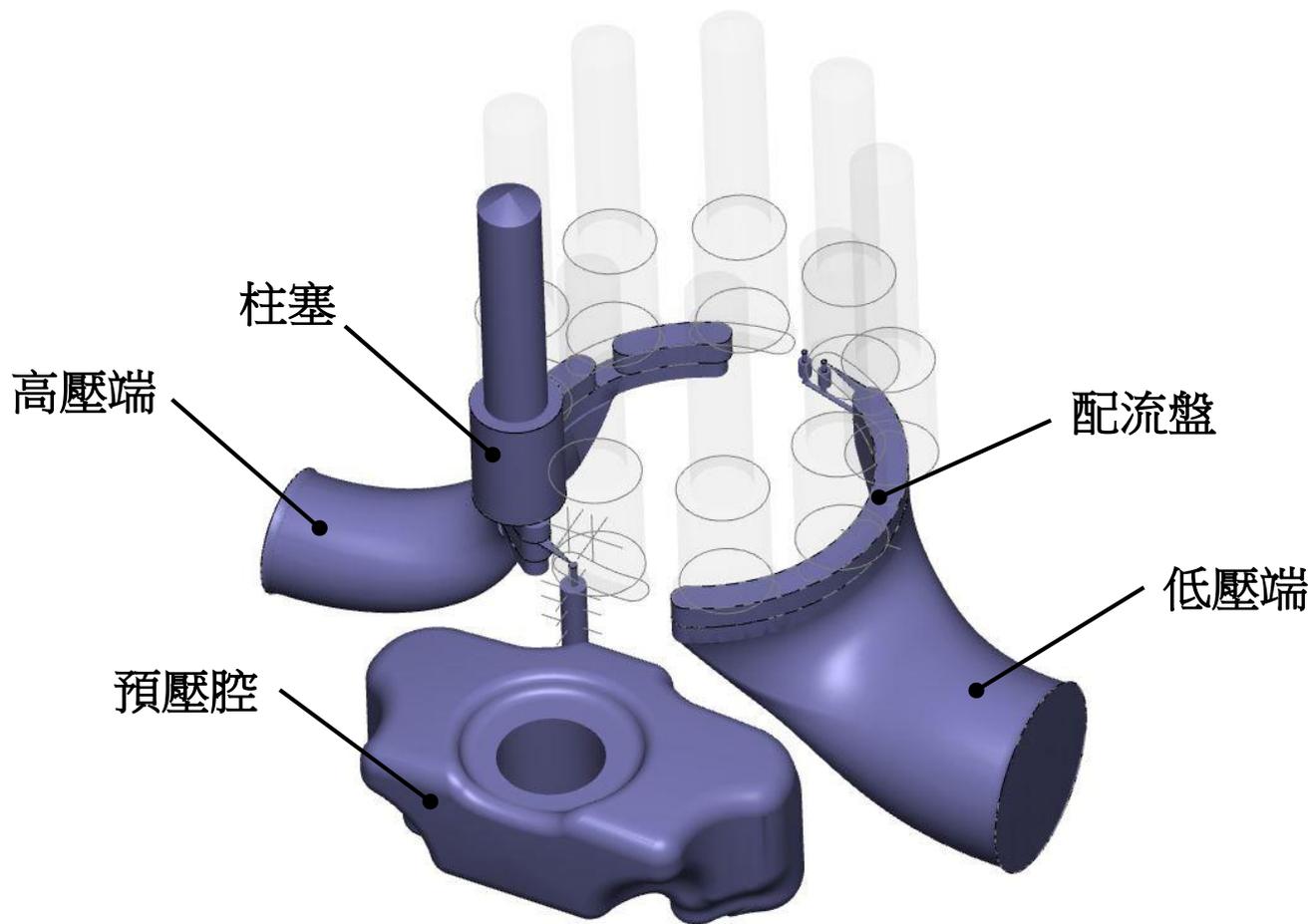


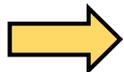
圖3.1 斜盤式柱塞泵流體模型



A. 研究方法

- PumpLinx模擬工作流程。

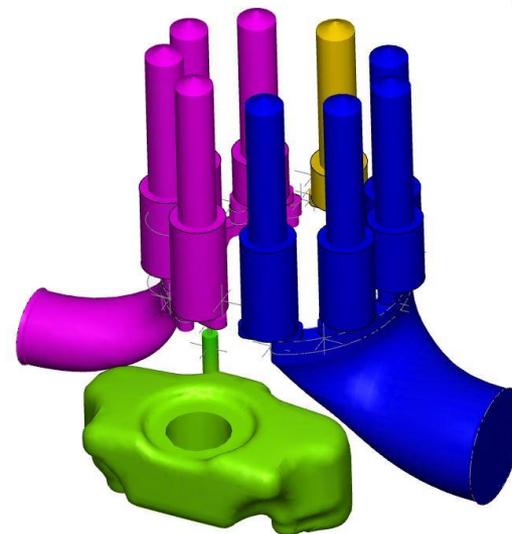
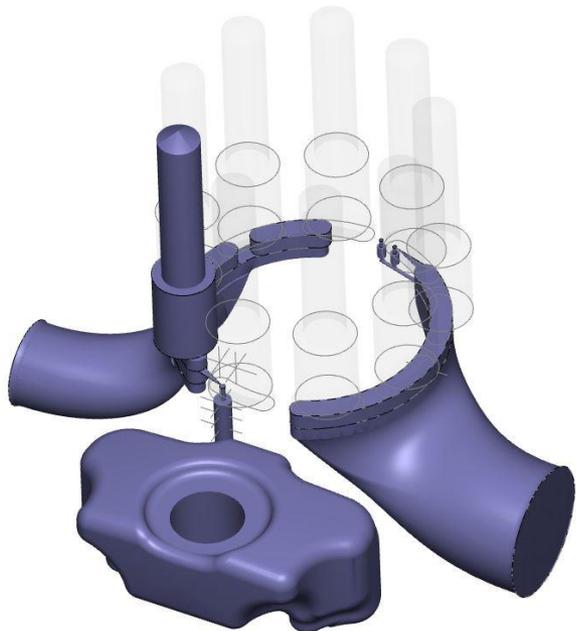
流體模型



模型網格化



模擬結果





A. 研究方法

- 斜盤式柱塞泵-壓力呈現。

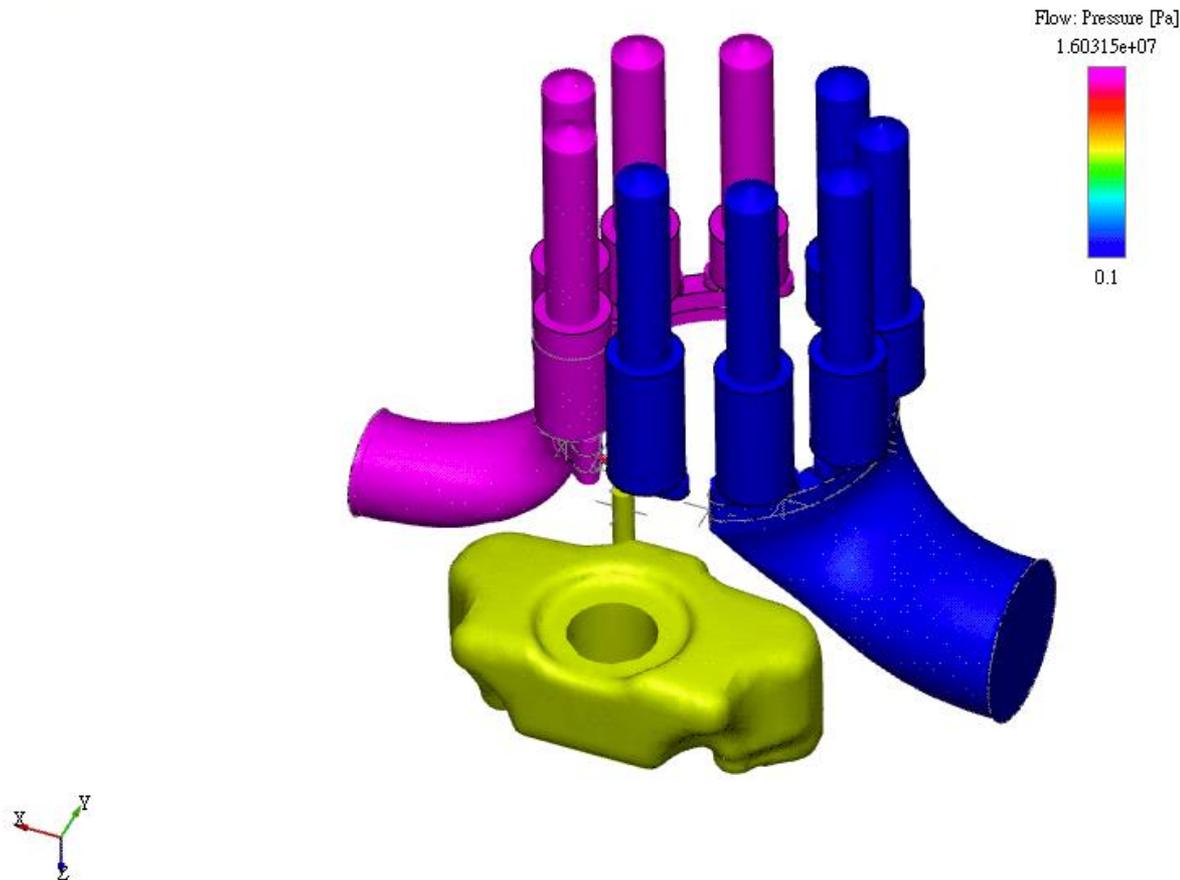
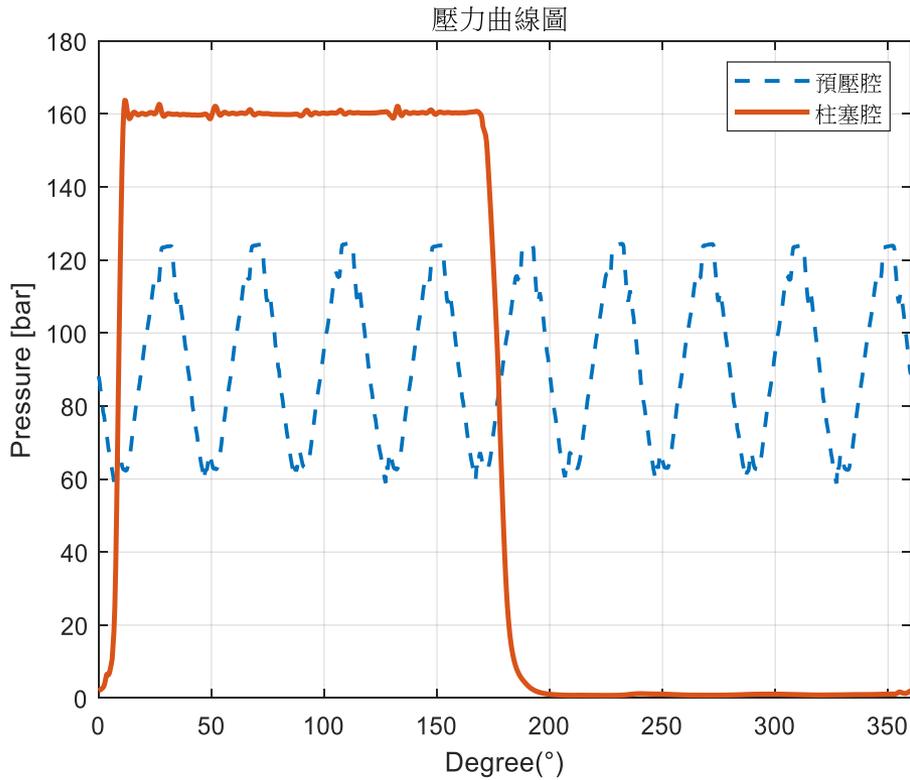


圖3.2 斜盤式柱塞泵之壓力分佈



A. 研究方法



- 柱塞腔在高壓端時因為排油而壓力迅速上升，柱塞旋轉至低壓端時開始吸油所以壓力開始下降，而預壓腔可以達到壓力補充與緩衝之作用。

圖3.3 柱塞腔與預壓腔之壓力曲線圖



B. 出口端流量

- 流量脈動的變化直接影響到泵體運轉所產生噪音與振動。以下研究結果均顯示流量曲線圖，以及不同設計之**流量脈動**數值表。

- 流量平均值為：
$$Q_{avg} = \frac{\sum_{p=1}^N Q_p}{N}$$
- 差值為：
$$\Delta Q = Q_{max} - Q_{min}$$
- 流量脈動率為：
$$\delta_Q = \left(\frac{\Delta Q}{Q_{avg}} \right) * 100\%$$



B. 出口端流量

- 模擬配流盤上有無溝槽的設計與泵體內有無預壓腔的4種的結構設計，觀察流量脈動的影響。

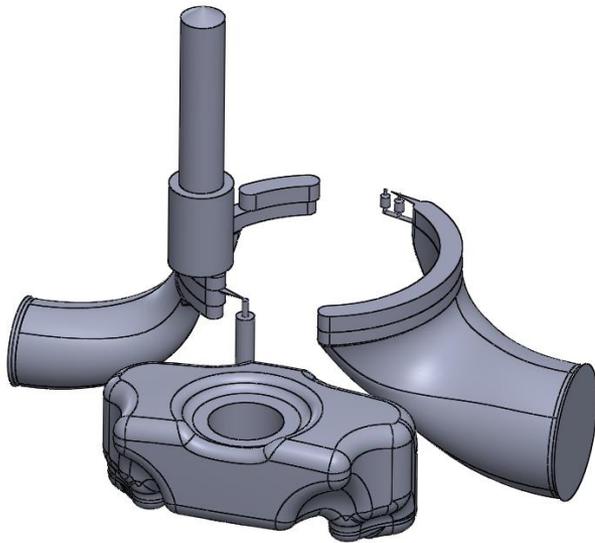


圖3.4 有溝槽、有預壓腔

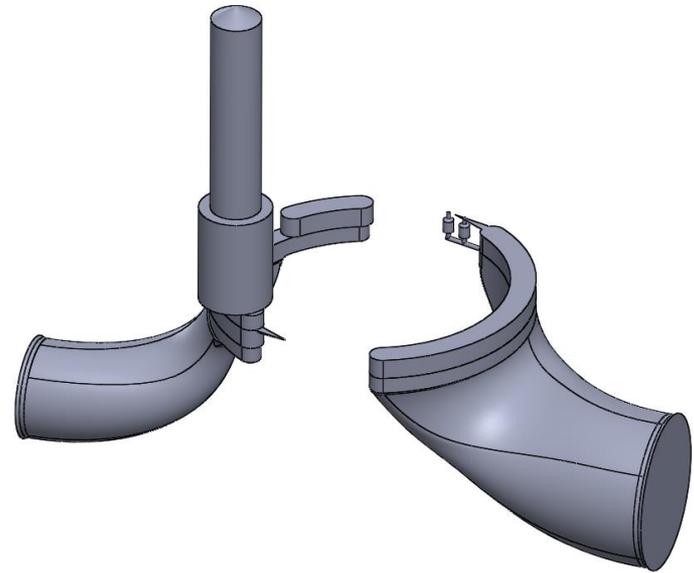


圖3.5 有溝槽、無預壓腔



B. 出口端流量

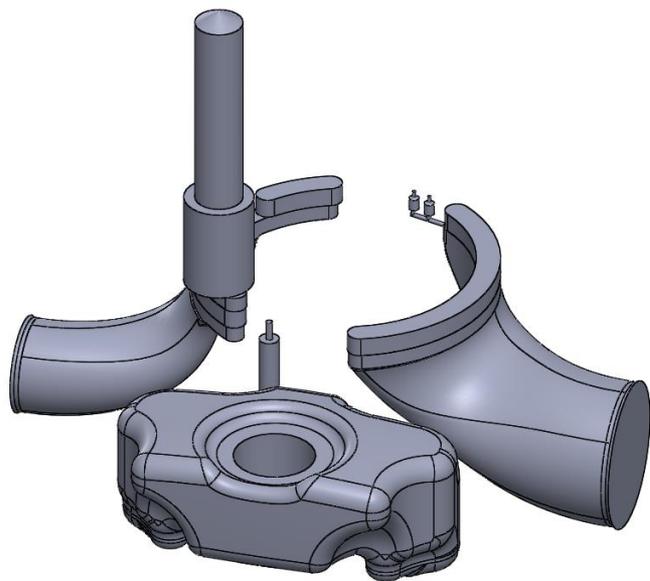


圖3.6 無溝槽、有預壓腔

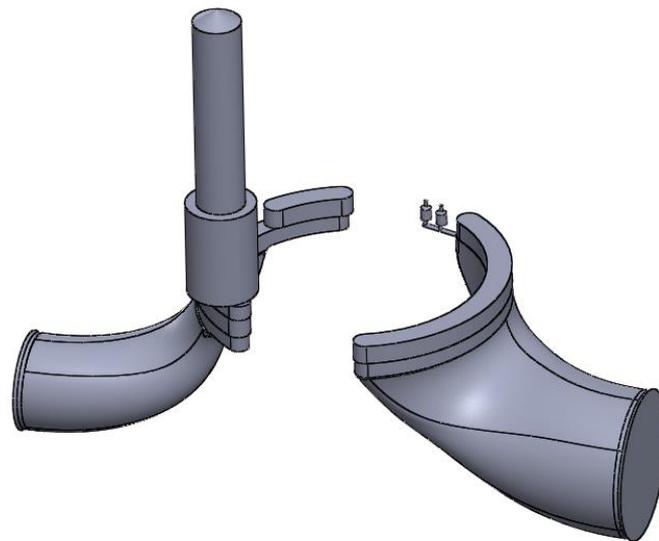
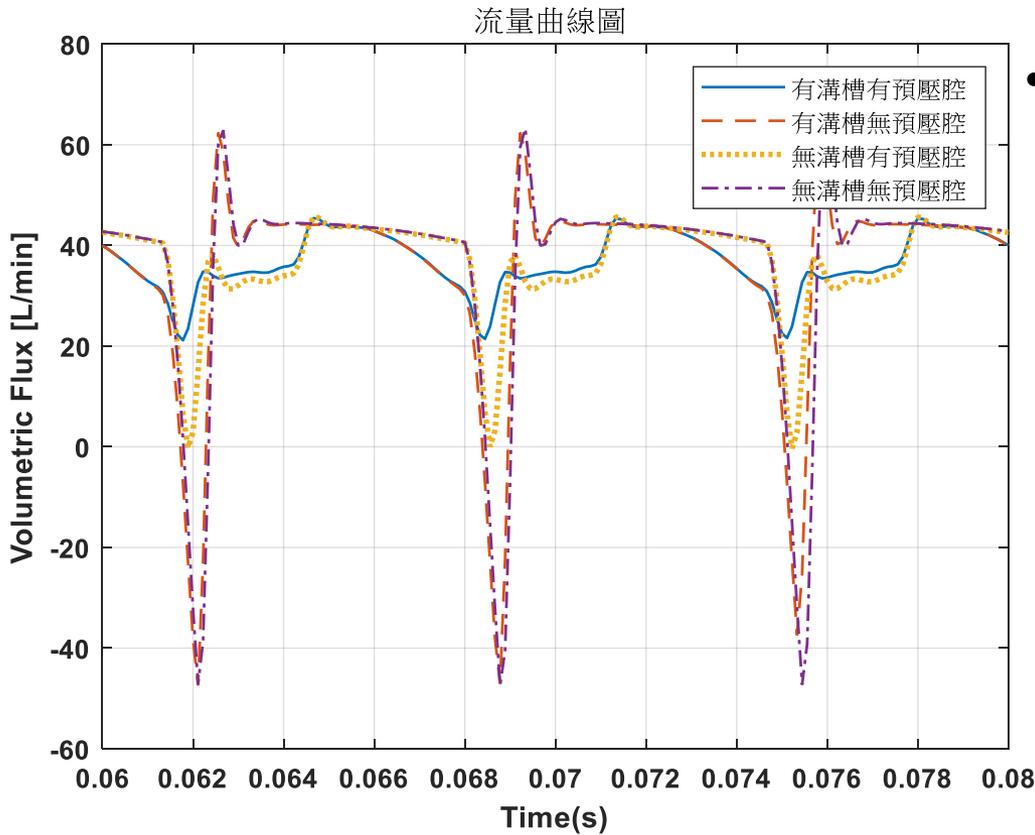


圖3.7 無溝槽、無預壓腔



B. 出口端流量

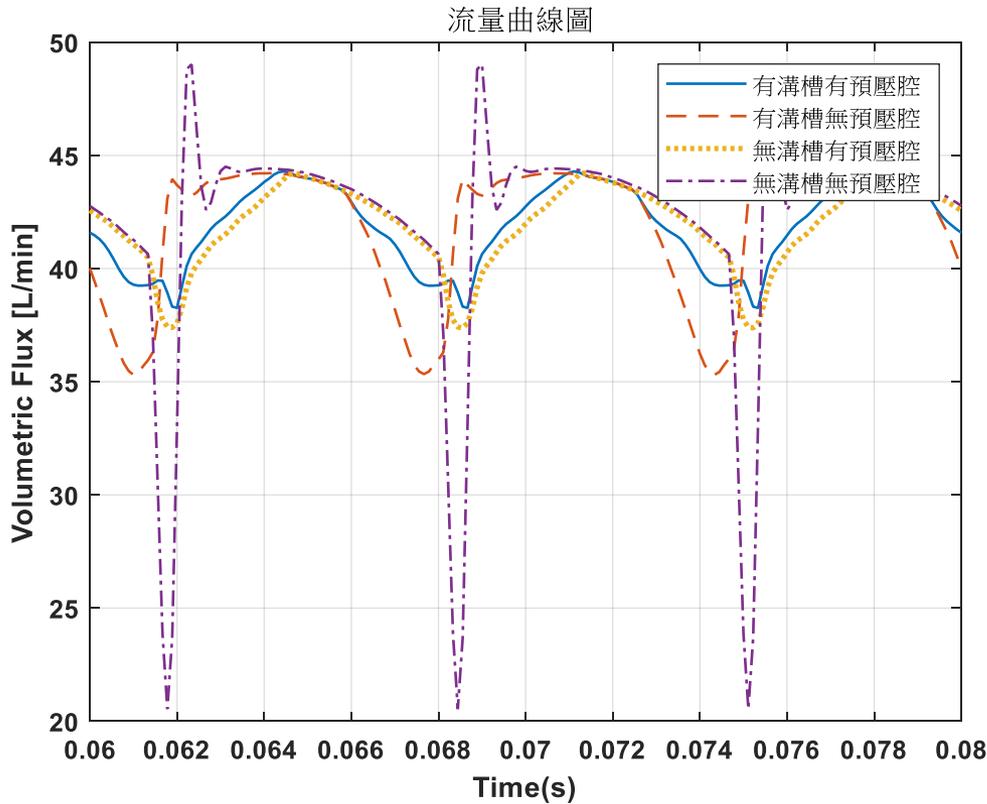


- 在沒有預壓腔的設計組合下，有回流的狀況，所以將調節入口端壓力設定值來執行模擬，入口端壓力初始設定壓力為1 bar，以調節入口端壓力至10 bar。

圖3.8 不同設計對於流量曲線圖(入口端壓力1 bar)



B. 出口端流量



- 在調節入口端壓力至10 bar後，無預壓腔設計下，造成回流的情況有明顯改善出口端流量的部分。可以明顯看出無溝槽無預腔的設計組合下流量值下降的比其他設計組合還多。

圖3.9 不同設計對於流量曲線圖(入口端壓力10 bar)



B. 出口端流量

表3.2 不同設計組合之流量脈動

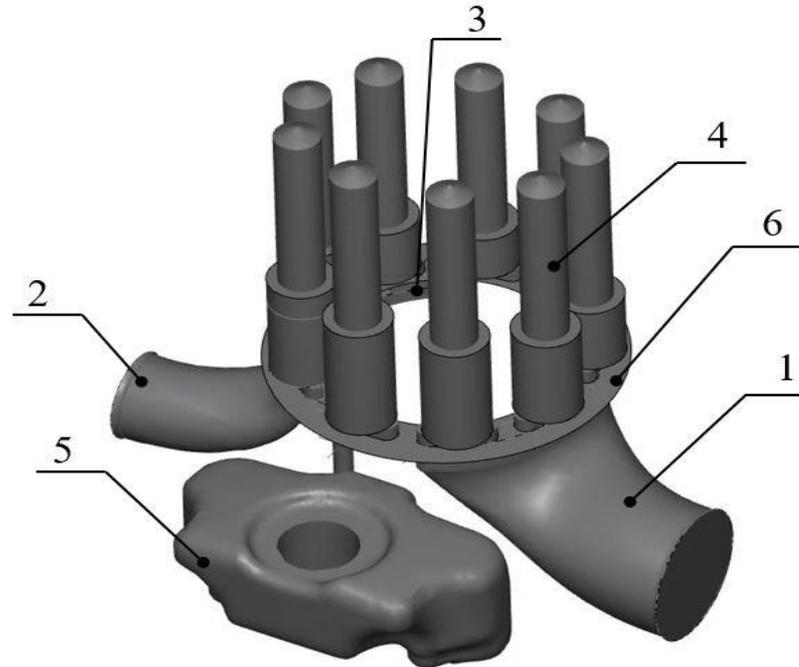
設計組合	Q_{max} (L/min)	Q_{min} (L/min)	Q_{avg} (L/min)	ΔQ (L/min)	δ_Q (%)
有溝槽有預壓腔	44.29	38.26	41.89	6.03	14.39
有溝槽無預壓腔	44.23	35.26	41.88	8.97	21.41
無溝槽有預壓腔	44.23	37.37	41.91	6.86	16.36
無溝槽無預壓腔	49.02	20.52	42.08	28.5	67.72

- 在沒有預壓腔的組合設計上流量脈動的數值都是相對偏高的，因此可以從模擬結果得知預壓腔與配流盤上的溝槽對於出口流量脈動是較佳的設計。



C. 配流盤油膜對於流量脈動之影響

- 斜盤式柱塞泵在運轉時柱塞與高低壓端口之間會形成一層油膜，在PumpLinx軟體中有建立了配流盤油膜模擬的功能，設定油膜內徑與外徑直接成形模擬所需要的配流盤油膜，如圖所示。



1 低壓端 2 高壓端 3 配流盤
4 柱塞 5 預壓腔 6 配流盤油膜

圖3.12 斜盤式柱塞泵液體模型(含配流盤油膜)



C. 配流盤油膜對於流量脈動之影響

- 設定油膜內徑與外徑直接成形模擬所需要的配流盤油膜，將模型產生網格化後開始進行模擬，觀察配流盤增加了油膜後對於出口流量的變化與流量脈動是否有影響。

表3.6 斜盤式柱塞泵油膜模擬基本參數

參數	數值
油膜外徑	0.045 m
油膜內徑	0.03 m
油膜厚度	10^{-6} m

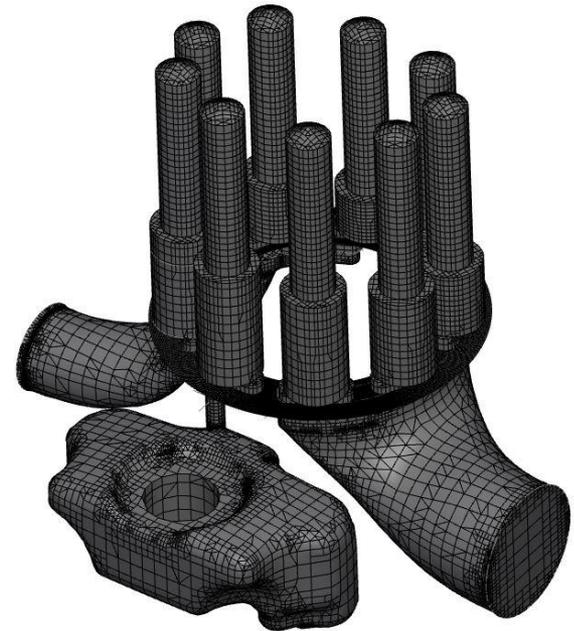


圖3.13 配流盤油膜網格化



C. 配流盤油膜對於流量脈動之影響

- 斜盤式柱塞泵與油膜-壓力呈現。

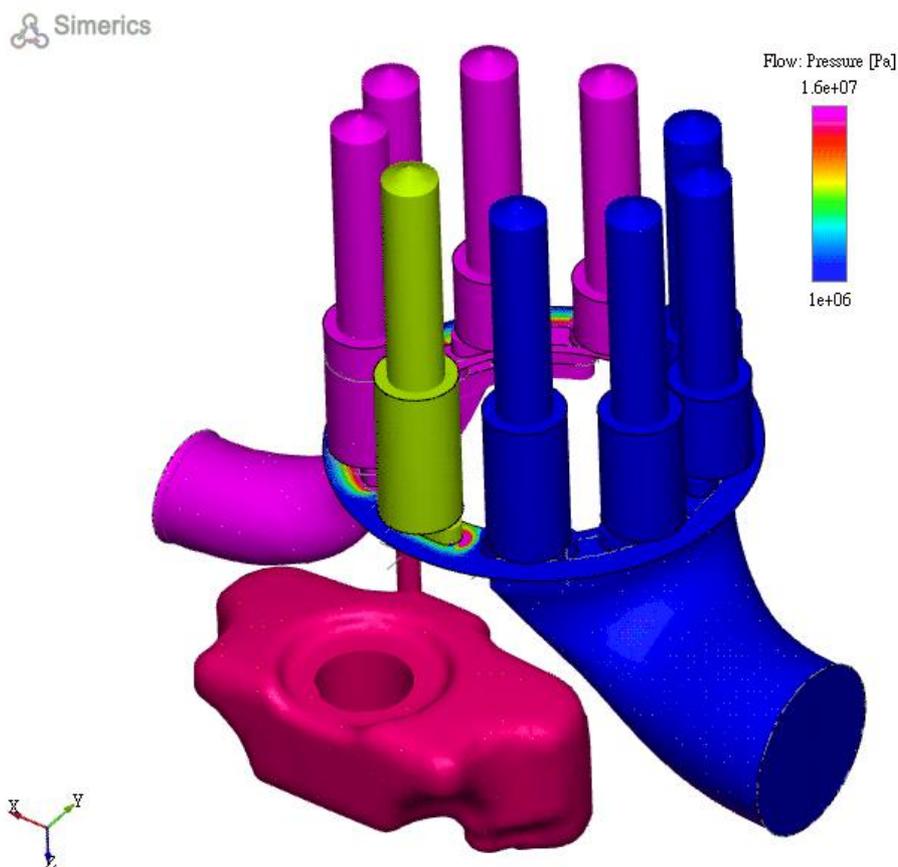


圖3.14 斜盤式柱塞泵壓力分佈(含配流盤油膜)



C. 配流盤油膜對於流量脈動之影響

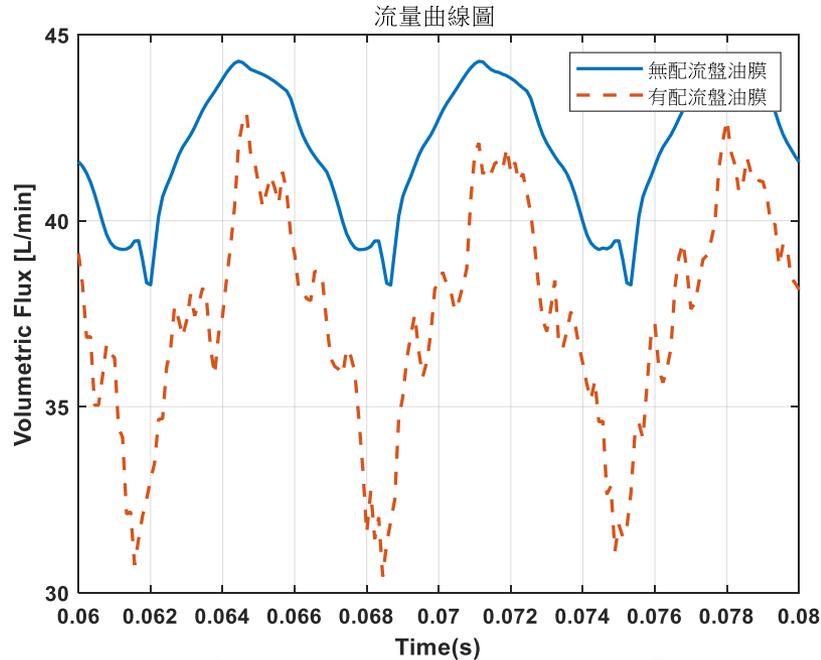


圖3. 19 有無配流盤油膜之流量曲線圖

- 可從圖得知在有配流盤油膜的設計下，因為有油膜內漏的關係，出口端的流量下降得比較多，相對流量脈動也會比較高。

設計組合	Q_{max} (L/min)	Q_{min} (L/min)	Q_{avg} (L/min)	ΔQ (L/min)	δ_Q (%)
有配流盤油膜	42.88	30.43	37.52	12.45	33.18
無配流盤油膜	44.29	38.26	41.89	6.03	14.41

表3. 7 有無油膜的流量脈動



大綱

- 01 | 摘要
- 02 | 斜盤式柱塞泵介紹與PumpLinx介紹
- 03 | 斜盤式柱塞泵模擬與分析
- 04 | 斜盤式柱塞泵模擬與空化分析 
 - A. 空化現象介紹
 - B. 斜盤式柱塞泵空化模擬研究方法
 - C. 分析參數設計
- 05 | 斜盤式柱塞泵滑靴副油膜分析
- 06 | 結論



A. 空化現象介紹

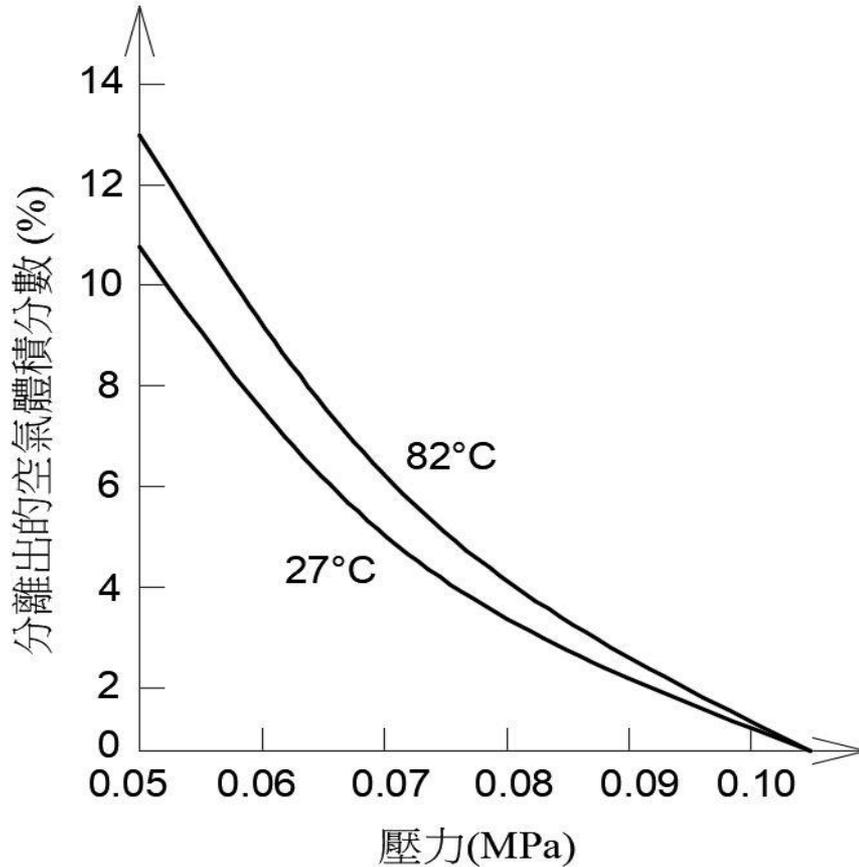
- 最早在水利機械中研究效率時發現了空化的現象，是指水輪機中在某區域的壓力低於水的空氣分離壓而產生空化的現象，然而空化的現象對水輪機元件的表面造成衝擊以至於破壞了水輪壁面。



圖4.1 水利機械空化侵蝕



A. 空化現象介紹



- 在液壓系統中，當液體某處的壓力低於空氣分離壓時，原先溶解在液體中的空氣就會分離出來，使液體中產生大量的氣泡，這種現象稱為空化現象或氣穴現象。

圖4.3 分離出的氣相體積分數與壓力之關係



B. 斜盤式柱塞泵空化模擬研究方法

- 本章節模擬斜盤式柱塞泵空化的現象，繪製泵體流體模型，匯入PumpLinx網格化後進行空化模擬。

表4.1 斜盤式柱塞泵空化模擬基本參數

參數	數值
轉速	1000 rpm
出口端負載壓力	160 bar
入口端負載壓力	1 bar
阻尼孔直徑	1.6 mm
阻尼孔角度	13.78°
預壓腔容積	93 c.c.

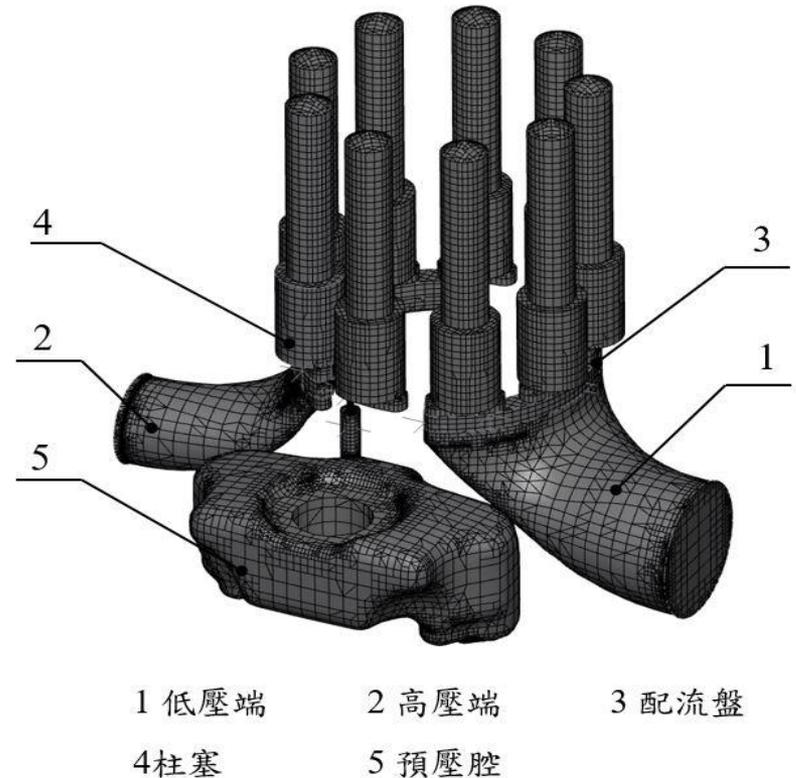


圖4.4 斜盤式柱塞泵空化模型網格化 35



B. 斜盤式柱塞泵空化模擬研究方法

- 從圖中觀察到整個泵體空化最明顯產生的地方為配流盤及柱塞接觸的位置，而運轉的位置是在柱塞從低壓端轉至高壓端配流盤溝槽時，空蝕的現象最為嚴重。

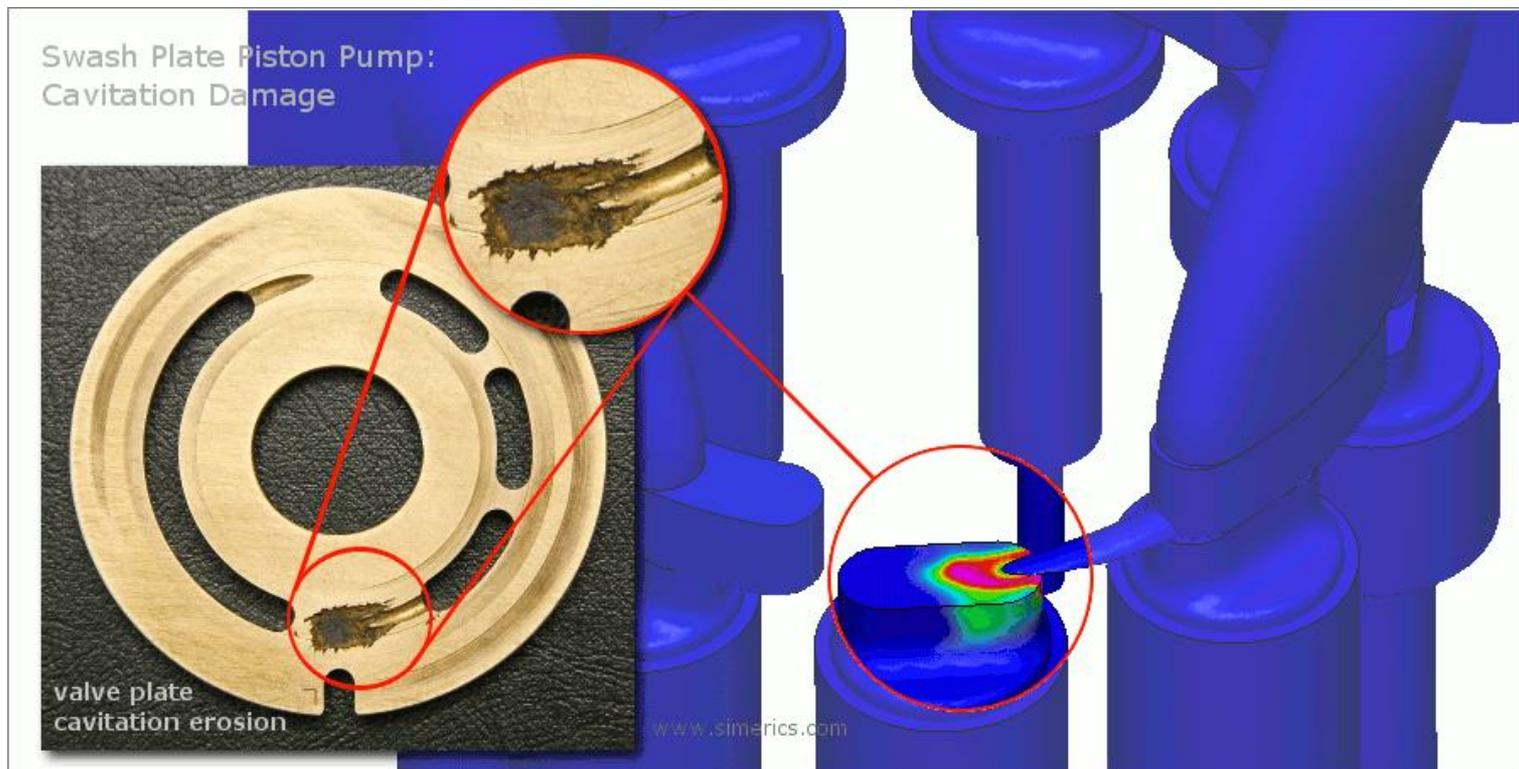


圖4.5 斜盤式柱塞泵之氣相體積分布



B. 斜盤式柱塞泵空化模擬研究方法

- 因柱塞腔內部的監測點經模擬後發現也有氣相體積分數的產生，而去調整顯示的範圍，既可以顯示出柱塞腔內部的空化程度。

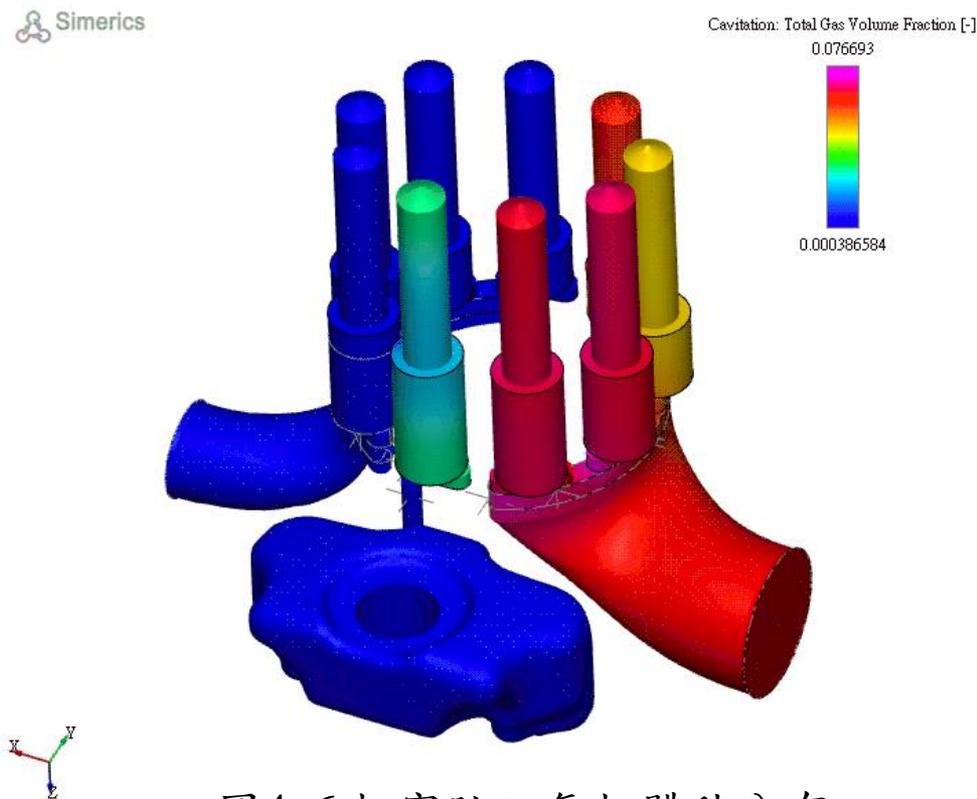
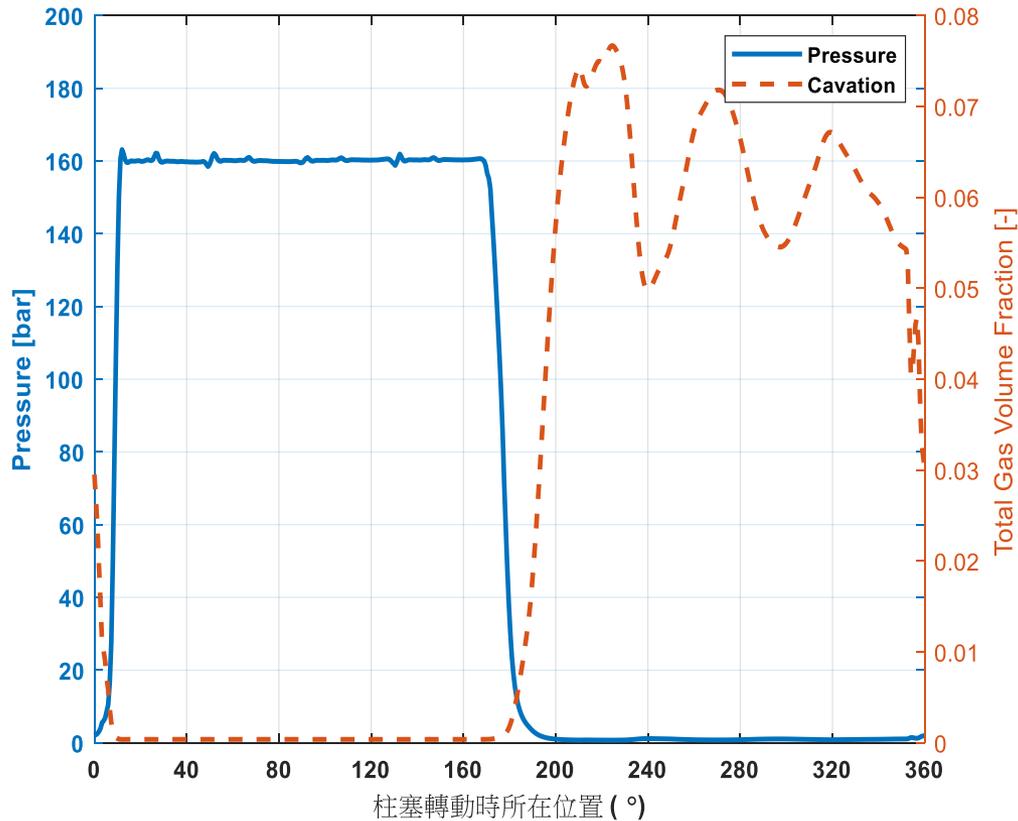


圖4.6 柱塞腔之氣相體積分佈



B. 斜盤式柱塞泵空化模擬研究方法



- 柱塞腔內的壓力與氣相體積分數的關係，在低壓端的工作階段，氣相體積分數較高，而在柱塞進入高壓端的工作階段時，因外部液壓油壓力較大，氣相體積分數也相對降低。

圖4.7 柱塞腔壓力與氣相體積分數曲線圖



C. 分析參數設計

- 產生柱塞腔內部空化現象最直接的原因為壓力變化，藉由改變出入口端壓力，是否有改善空化現象的產生，而監測點的位置是設置在**柱塞腔內**與**配流盤**上。

表4.2 斜盤式柱塞泵空化模擬參數設計

參數	數值		
出口端負載壓力	160 bar	360 bar	560 bar
入口端負載壓力	1 bar	5 bar	10 bar



C. 分析參數設計-出口端壓力

- 在入口端壓力固定的情況下，出口端的輸出負載壓力越高，壓差就會越大，柱塞腔內的氣相體積分數會越高，而空化產生的現象會越嚴重。

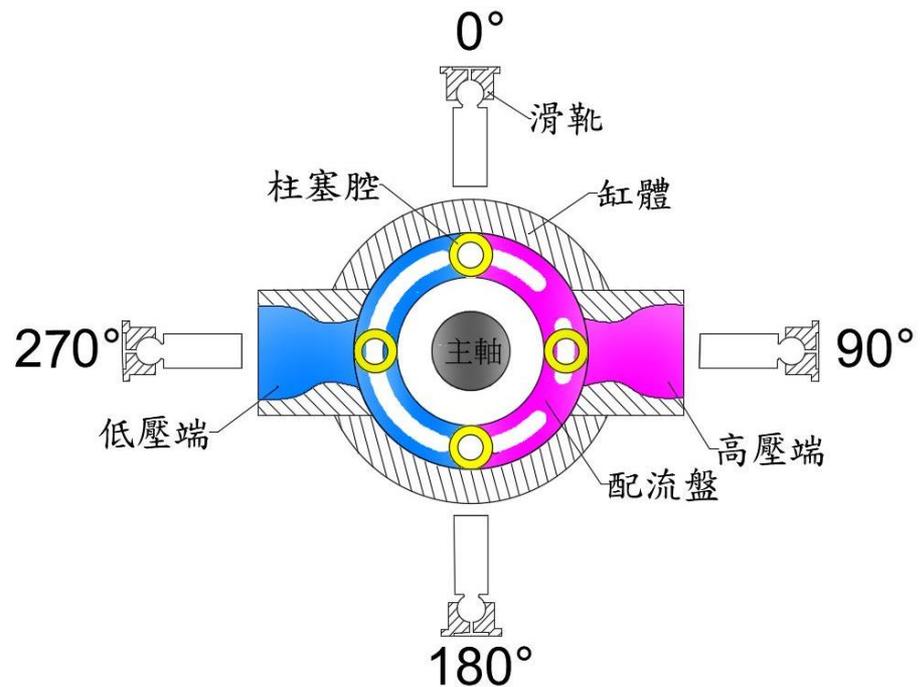
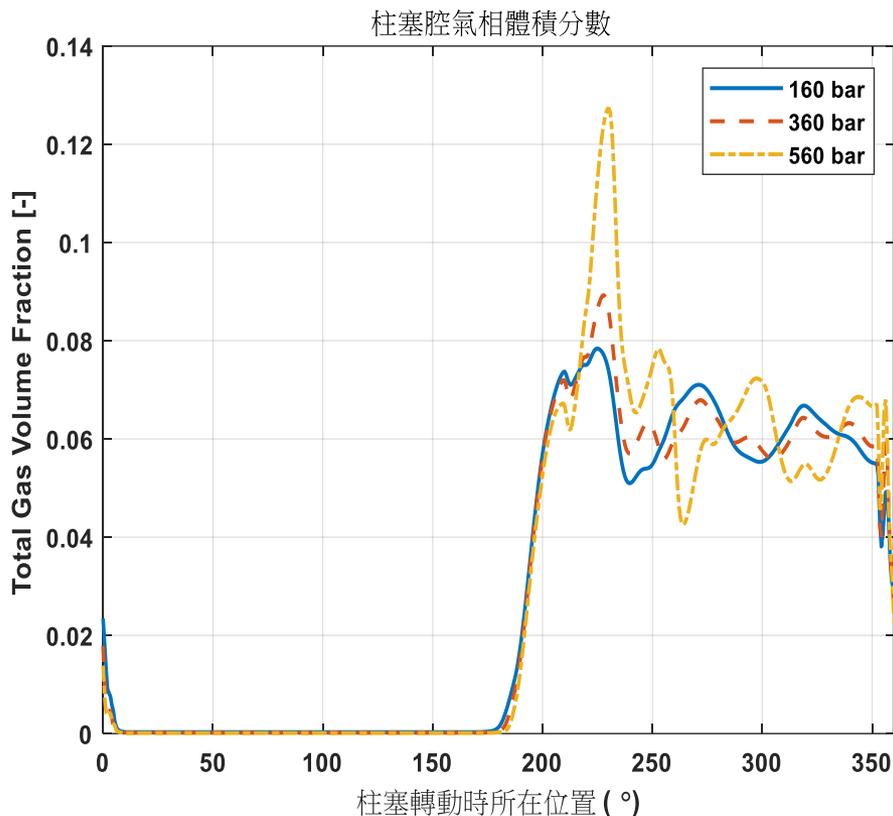


圖4.9 不同出口負載壓力之柱塞腔氣相體積分數曲線圖



C. 分析參數設計

- 在配流盤上的氣相體積分數也會越高，而空化產生的現象會越嚴重。

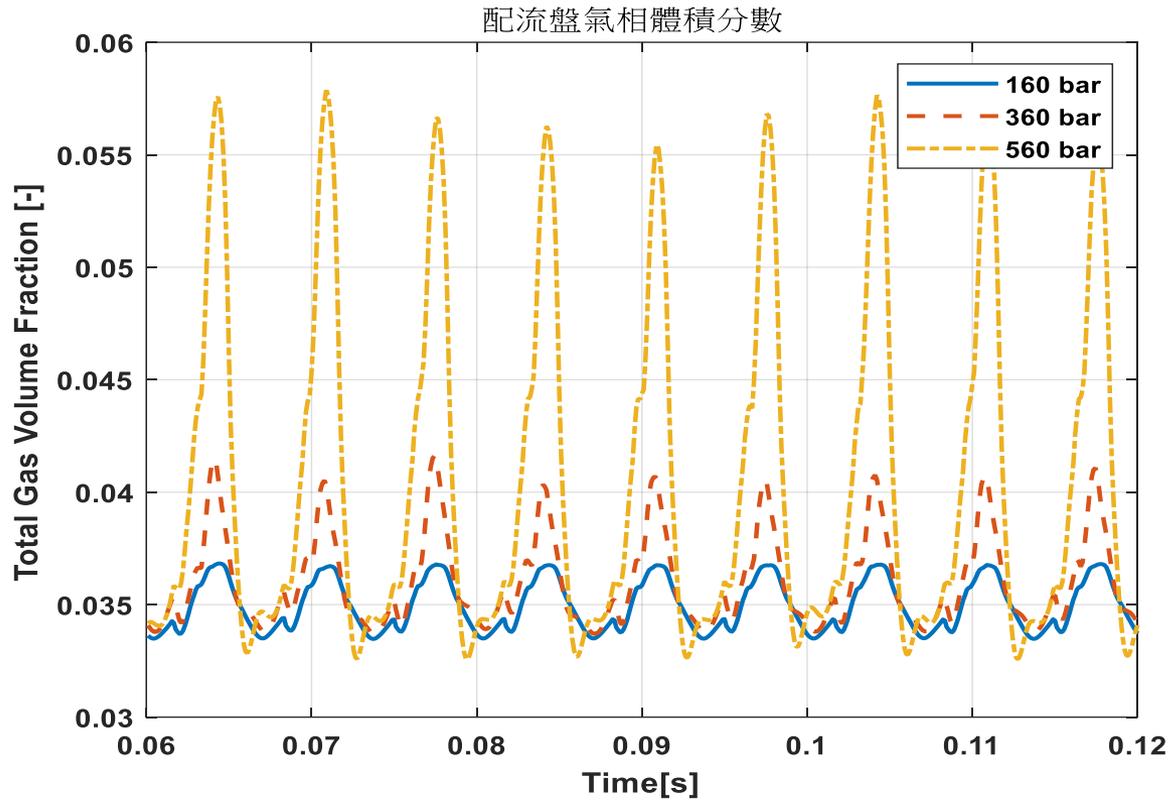


圖4.11 不同出口負載壓力之配流盤氣相體積分數曲線圖



C. 分析參數設計-入口端壓力

- 在增加入口壓力的狀況下氣相體積分數減少許多，氣相體積分數也較為穩定。進而也改善了柱塞腔在低壓端的空化現象。

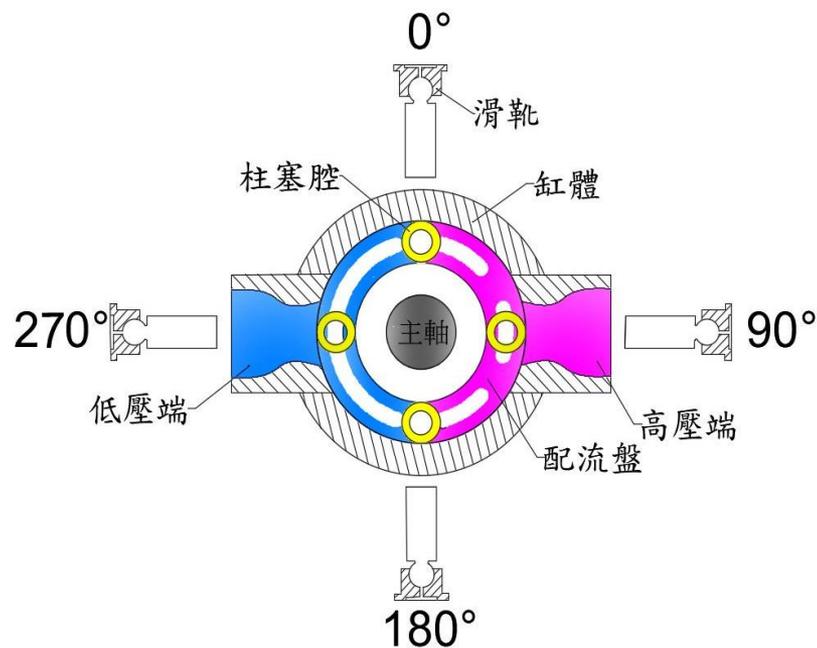
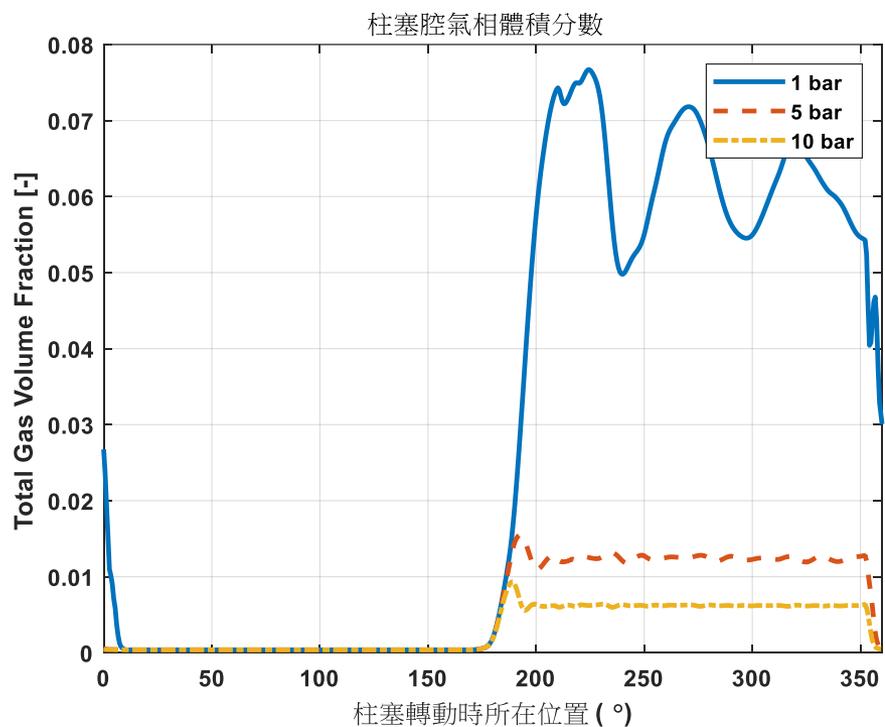


圖4.15 不同入口負載壓力之柱塞腔氣相體積分數曲線圖



C. 分析參數設計

- 在配流盤上氣相體積分數產生的狀況不只減少了也較為穩定，改善了柱塞從高壓端到低壓端在配流盤上的空化現象。

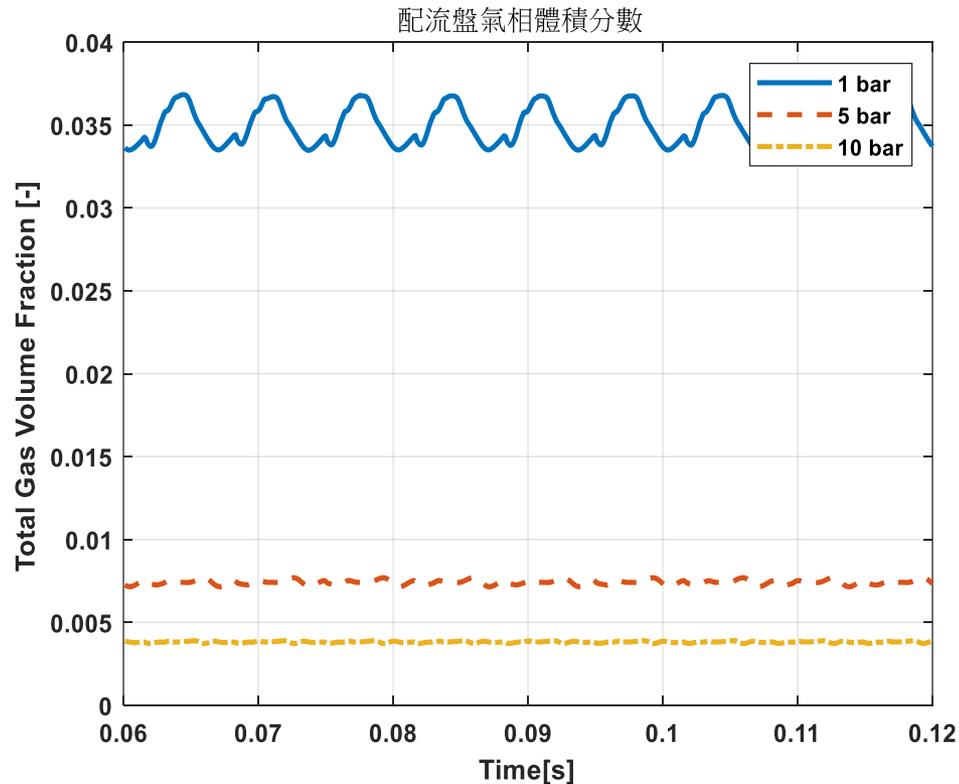


圖4. 16 不同入口負載壓力之配流盤氣相體積分數曲線圖



大綱

01 | 摘要

02 | 斜盤式柱塞泵介紹與PumpLinx軟體介紹

03 | 斜盤式柱塞泵模擬與分析

04 | 斜盤式柱塞泵模擬與空化分析

05 | 斜盤式柱塞泵滑靴副油膜分析 

A. 斜盤式柱塞泵滑靴介紹

B. 斜盤式柱塞泵滑靴副特性研究

C. 斜盤式柱塞泵滑靴副油膜結果分析

06 | 結論



斜盤式柱塞泵滑靴副油膜分析

- 本章節是以斜盤式柱塞泵中的滑靴油膜進行流體模擬，與吳小鋒老師進行協助研究。運用在PumpLinx軟體中模擬斜盤式柱塞泵流體所得到動態數據來通過MATLAB軟體程式的編寫，模擬斜盤式柱塞泵滑靴副油膜分析。



A. 斜盤式柱塞泵滑靴介紹

- 斜盤式柱塞泵在正常工作狀態下，滑靴與斜盤之間會形成一層油膜，油膜產生的位置稱為滑靴副，如圖所示。該油膜的主要作用是為了滑靴與斜盤相對運動時能順利產生潤滑作用，避免滑靴與斜盤直接接觸而防止燒盤的現象。

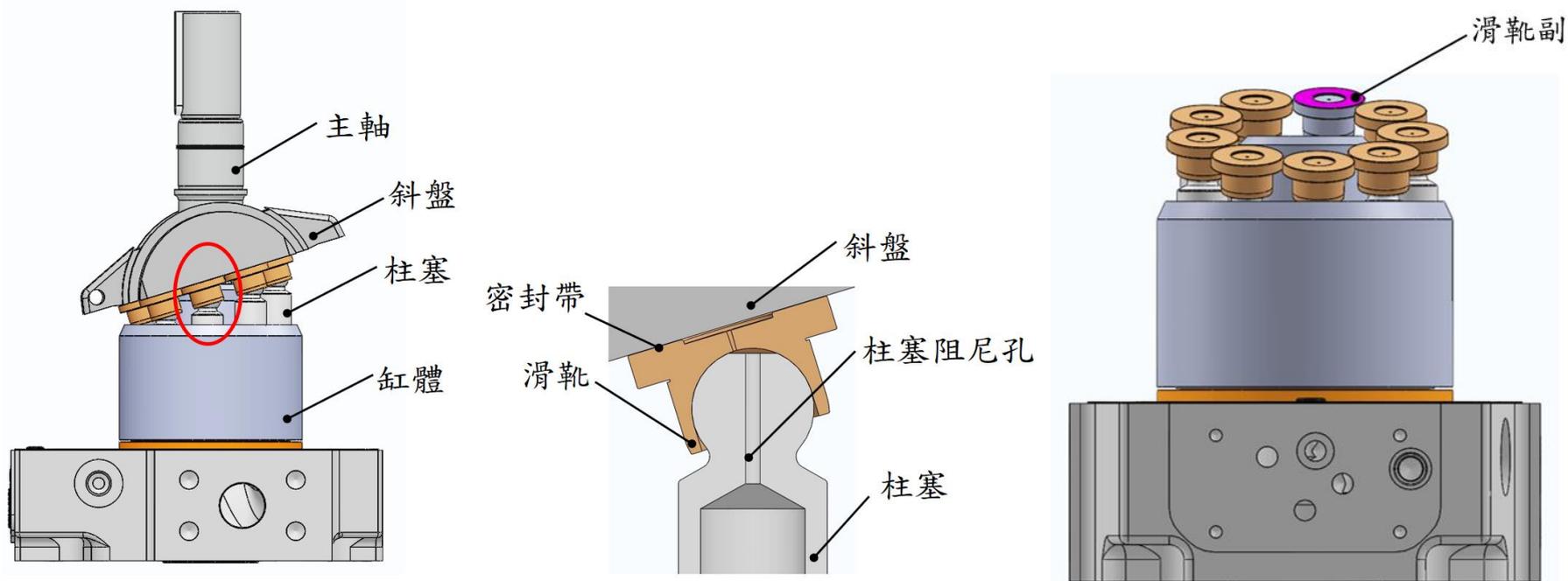


圖5.1 滑靴與泵體結構視圖



B. 斜盤式柱塞泵滑靴副特性研究

- 滑靴副高速高壓的條件下運轉時，滑靴由於受離心力矩作用，會產生傾覆的現象，也就是說滑靴副油膜的實際形狀為楔型，如圖所示。

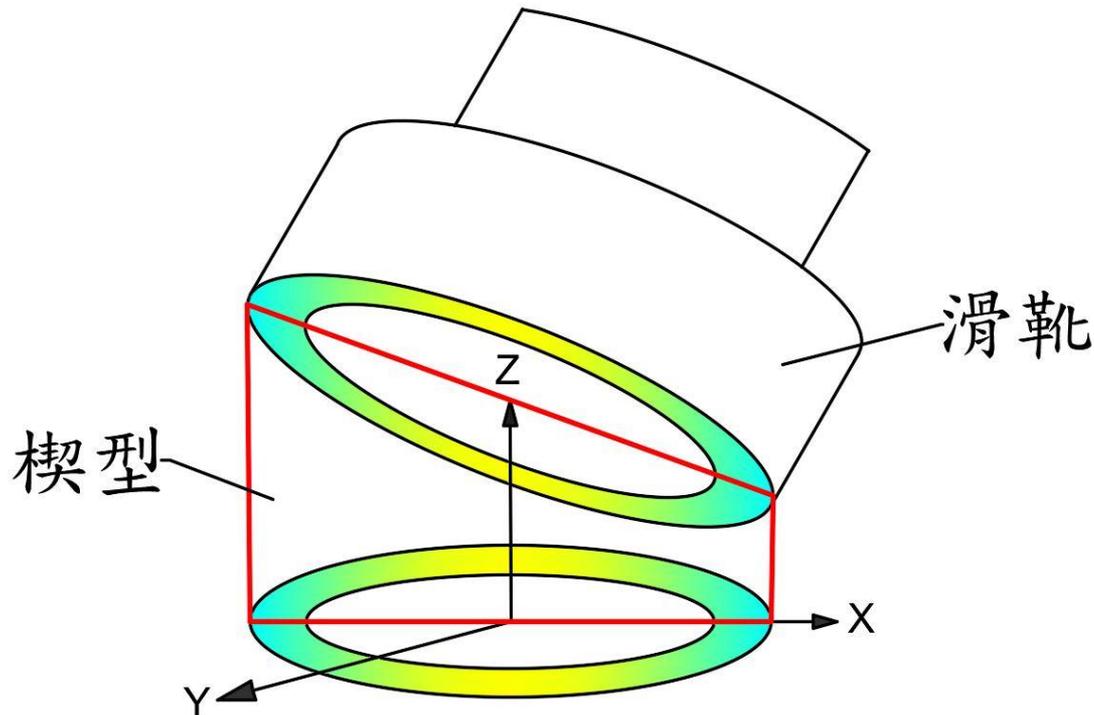


圖5.2 滑靴副楔型油膜



B. 斜盤式柱塞泵滑靴副特性研究

- 滑靴油膜厚度會形成楔型，厚度個點的值是不同的，所以滑靴油膜的厚度無法用單一的厚度值來表示，需以厚度場來進行滑靴油膜厚度的呈現。楔型油膜厚度為滑靴底面的各點與斜盤平面之間的距離。

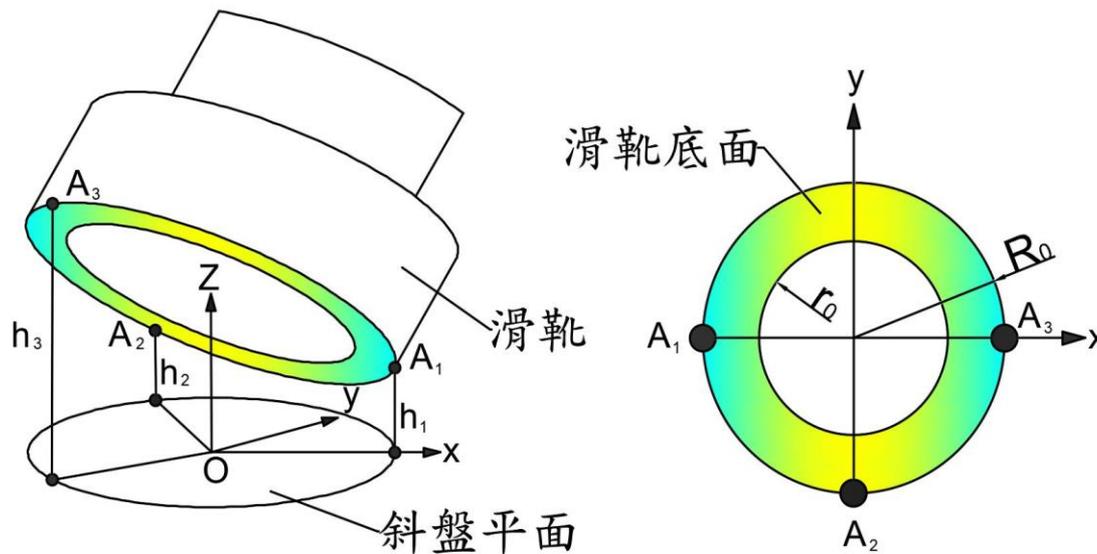


圖5.3 滑靴油膜厚度場描述

- A_1 、 A_2 、 A_3 為滑靴底面基準點， h_1 、 h_2 、 h_3 為滑靴底面基準點到斜盤平面的距離，既為滑靴底面任一點的厚度， R_0 為滑靴底面外徑， r_0 滑靴底面內徑。



B. 斜盤式柱塞泵滑靴副特性研究

- 有限差分法，求解流體力學一種數值方法，它是將求解區域劃分為差分網格，在有限個網格節點中推導出節點的差分方程組。將連續的變量離散化，來求解差分方程組。

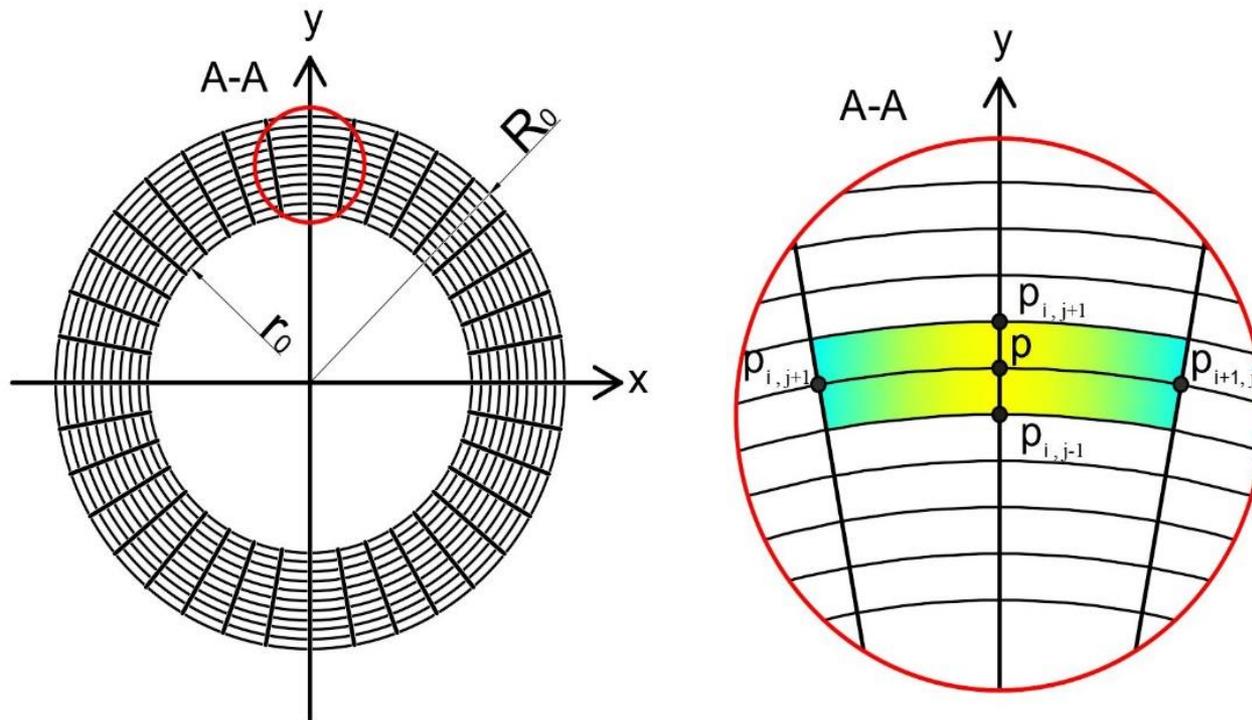


圖5.4 滑靴副油膜網格化分示意圖



B. 斜盤式柱塞泵滑靴副特性研究

- 因斜盤式柱塞泵運轉時為動態的過程，而滑靴副的厚度場與壓力場的分析需加以考量滑靴受力的狀況，如圖所示。

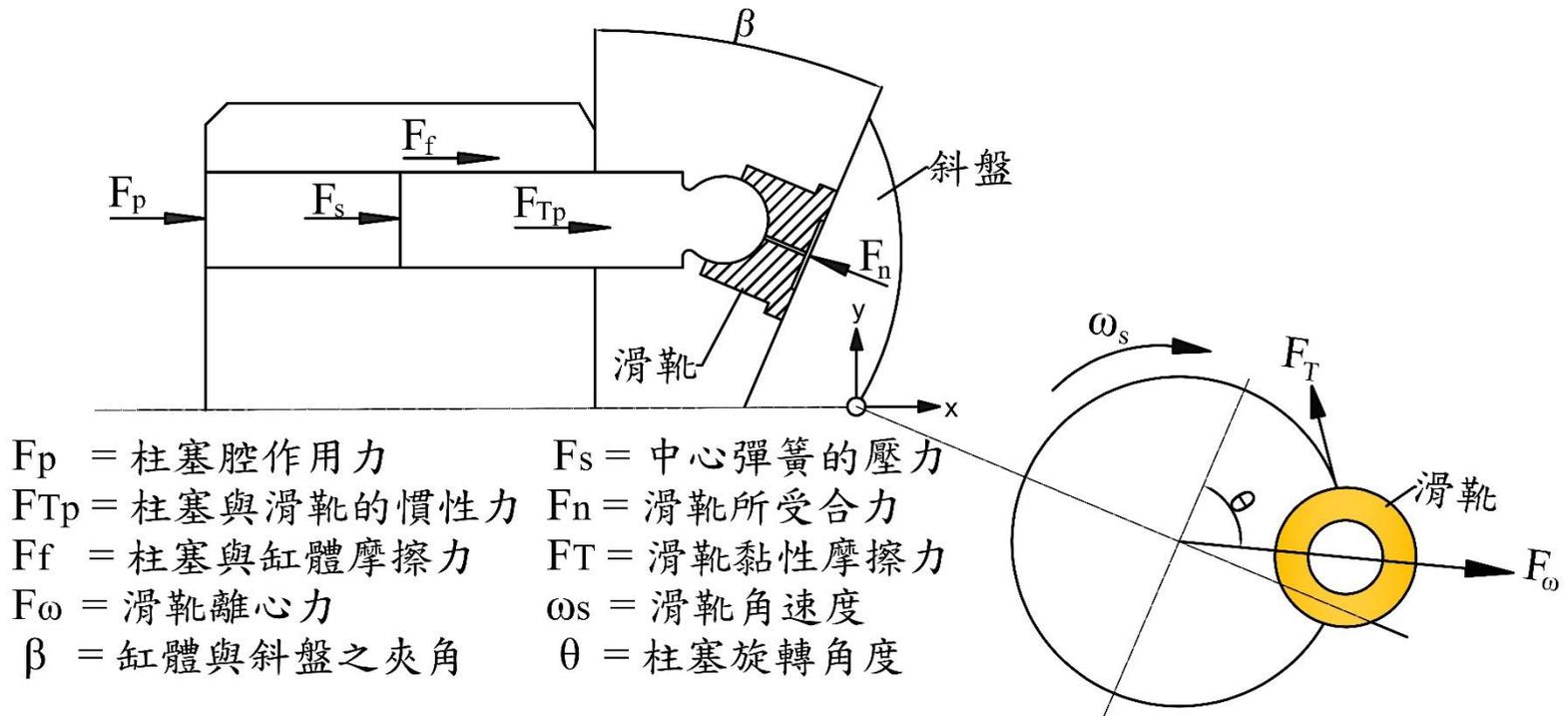


圖5.5 滑靴受力狀況示意圖



B. 斜盤式柱塞泵滑靴副特性研究

- 滑靴在軸向所受的作用力為 $F_n(t)$ 等於滑靴底面油膜壓力場在軸向的作用力 $F_o(h, h', t)$ ；滑靴加速度引起的離心力矩為 $M_{sx}(t)$ 等於滑靴底面油膜徑向剪切力力矩為 $M_{ox}(h, h', t)$ ；滑靴摩擦力引起的離心力矩 $M_{sy}(h, h', t)$ 為等於滑靴底面油膜縱向剪切力力矩為 $M_{sy}(h, h', t)$ ，為方程式(5-1)。

$$\begin{cases} F_n(t) + F_o(h, h', t) = 0 \\ M_{sx}(t) + M_{ox}(h, h', t) = 0 \\ M_{sy}(h, h', t) + M_{oy}(h, h', t) = 0 \end{cases} \quad (5-1)$$



C. 斜盤式柱塞泵滑靴副油膜結果分析

- 本章節所使用PumpLinx軟體的CFD模擬出斜盤式柱塞泵運轉一周的柱塞腔壓力，如圖所示，將此柱塞腔壓力帶入，對滑靴副油膜壓力場與厚度場進行模擬。

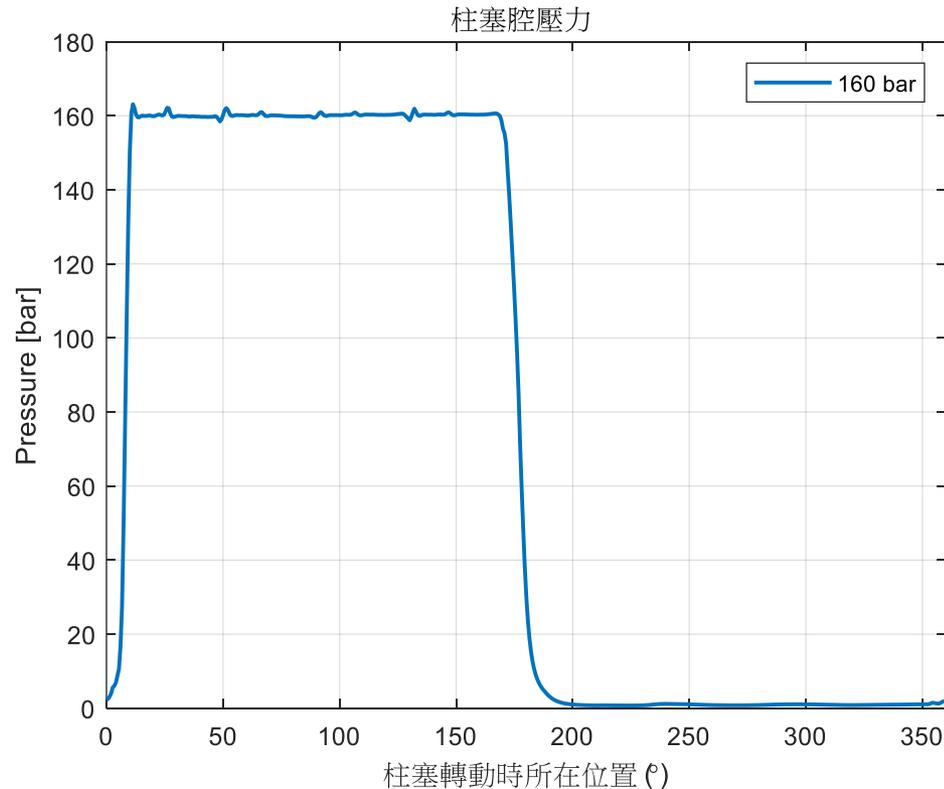


圖5.6 柱塞腔壓力之曲線圖



C. 斜盤式柱塞泵滑靴副油膜結果分析

- 楔型油膜底面厚度為各點到斜盤距離，運轉圈數為5圈的條件下進行模擬，所得到的油膜三點厚度，如圖所示，可以觀察到在運轉到第三圈時三點的油膜厚度開始呈現規律的變化，油膜變化達到穩定的趨勢。

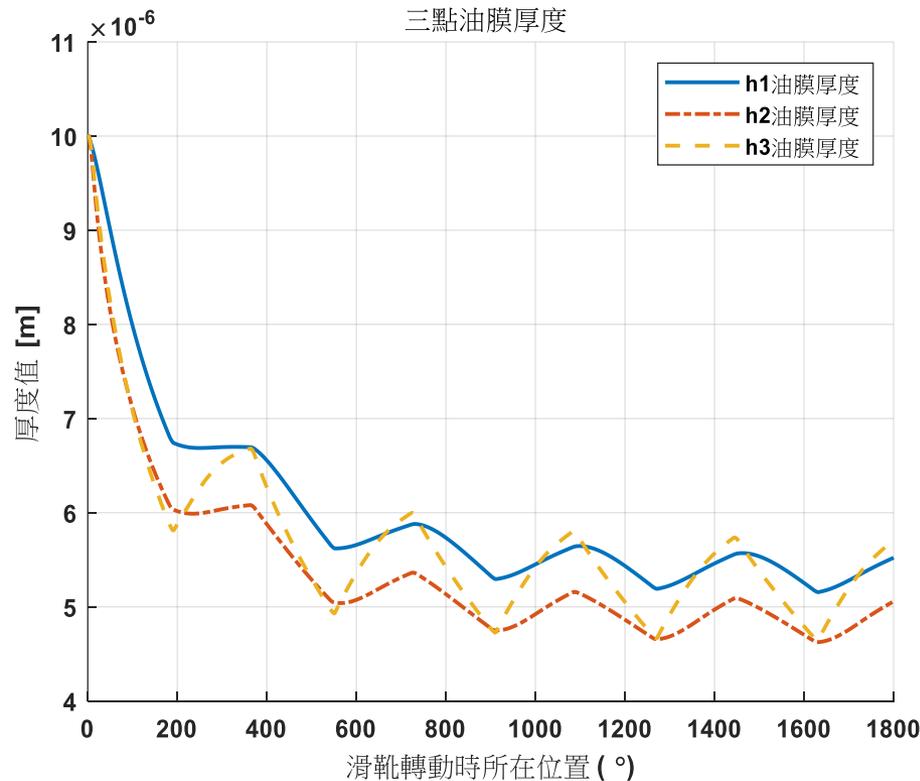


圖5.7 滑靴副三點厚度油膜之曲線圖



C. 斜盤式柱塞泵滑靴副油膜結果分析

- 當滑靴旋轉至10度左右時，開始進入高壓端，達到設置的出口負載壓力160 bar，滑靴三點油膜的厚度開始逐漸下降。而當滑靴運轉至高壓端進低壓端時，接著滑靴選轉至190度左右時，滑靴三點油膜的厚度開始逐漸上升。

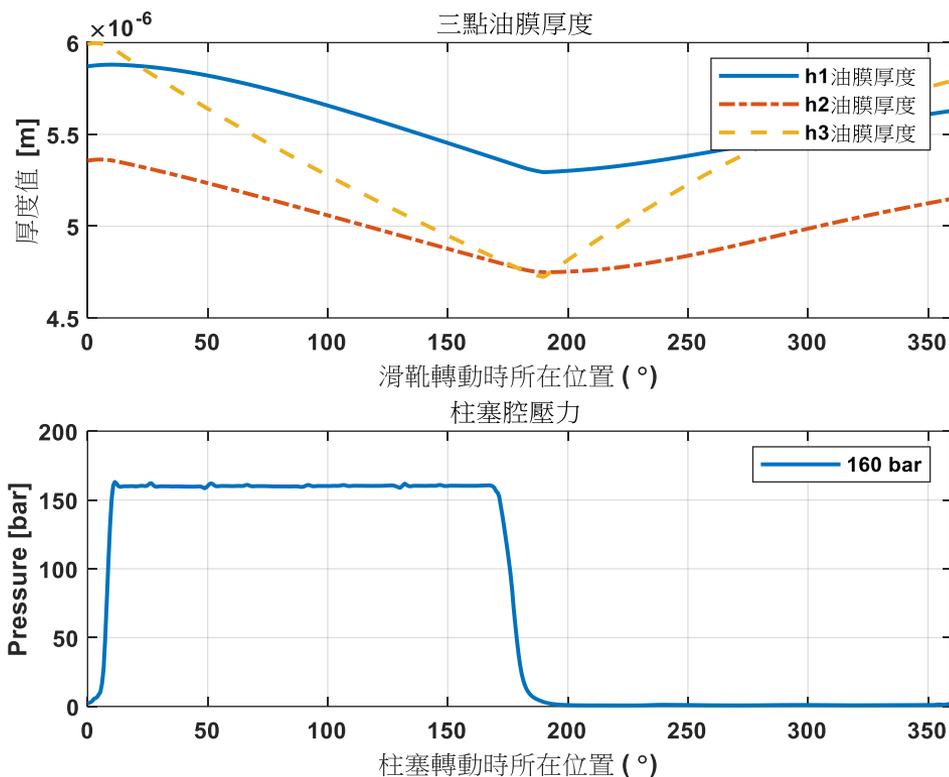


圖5.8 滑靴副三點油膜厚度與柱塞腔壓力之曲線圖



C. 斜盤式柱塞泵滑靴副油膜結果分析

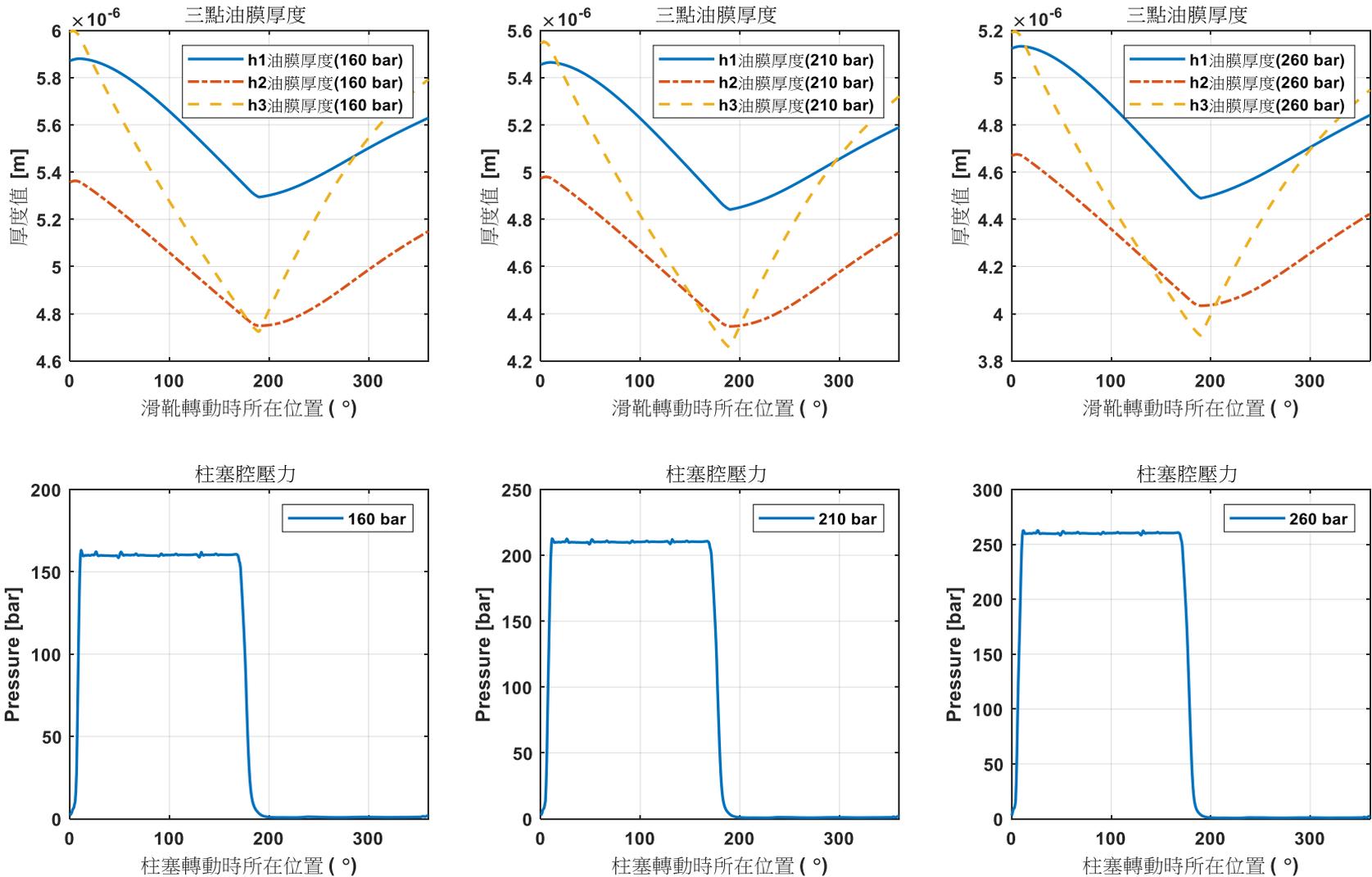


圖5.9 不同負載壓力之滑靴副油膜三點厚度曲線圖



C. 斜盤式柱塞泵滑靴副油膜結果分析

- 選擇觀察的位置為滑靴旋轉至 10° 、 90° 、 190° 、 270° 進行油膜厚度場與壓力場的分析。

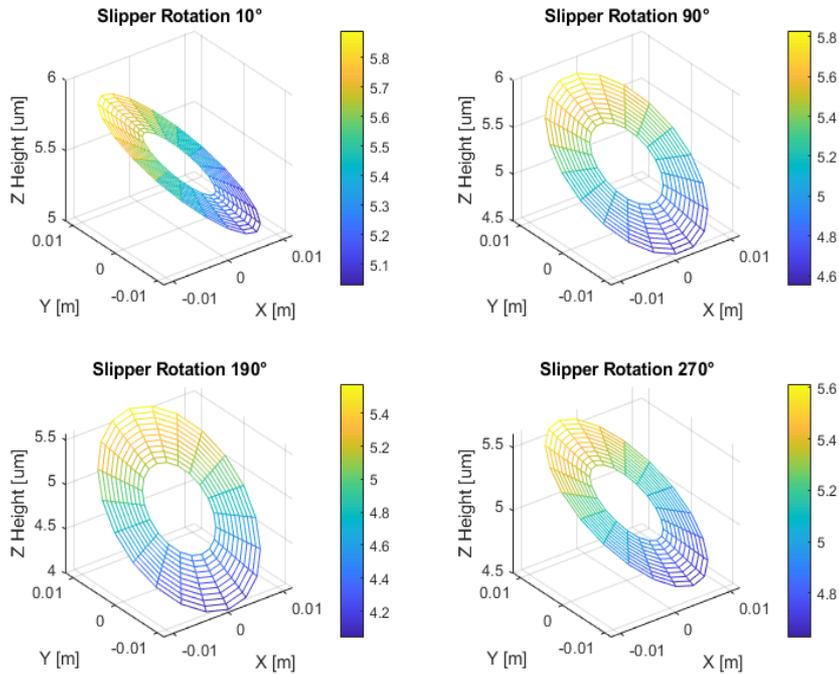


圖5.10 滑靴副油膜厚度場

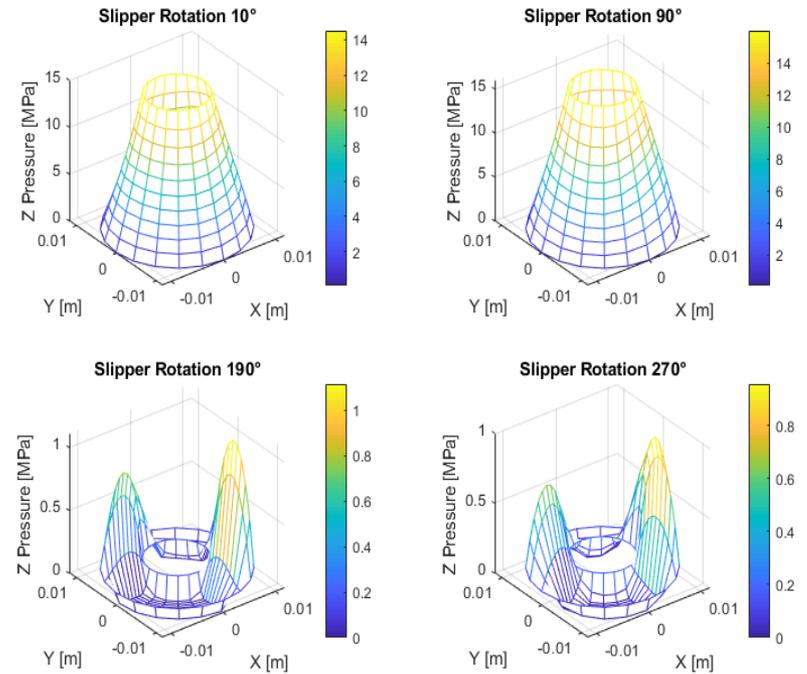


圖5.11 滑靴副油膜壓力場



大綱

- 01 | 摘要
- 02 | 斜盤式柱塞泵介紹與PumpLinx軟體介紹
- 03 | 斜盤式柱塞泵模擬與分析
- 04 | 斜盤式柱塞泵模擬與空化分析
- 05 | 斜盤式柱塞泵滑靴副油膜分析
- 06 | 結論 



結論

- 配流盤上含有溝槽與泵體含有預壓腔的條件下，對於斜盤式柱塞泵可有效的降低流量脈動。
- 可以發現泵體空化的現象主要發生在低壓端的部分，在不改變泵體結構的情況下，分析參數的設計以改變入口端壓力會有較大的改善效果。



結論

- 滑靴副油膜主要揭示了滑靴副的潤滑機理，為滑靴的結構設計奠定了潤滑現象的基礎與理論依據。
- 滑靴副油膜厚度越小能承受較高的負載壓力，但在油膜厚度較薄的狀況下，滑靴與斜盤在長時間的運轉下會造成表面摩擦耗損較為嚴重。
- 由壓力場與厚度場的觀察比對，滑靴在低壓端運轉時滑靴傾覆程度比較大，說明了此時滑靴處於不穩定的運轉狀態。



Thank you for your attention!