

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

利用 DSMC 於渦輪分子幫浦之流場分析

Analysis of the Flow in Turbomolecular Pump

Using DSMC

計畫類別： ● 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 90-2212-E-009-55

執行期間： 90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

計畫主持人：崔燕勇

執行單位：國立交通大學機械系

中華民國 91 年 7 月 31 日

利用 DSMC 於渦輪分子幫浦之流場分析
Analysis of the Flow in Turbomolecular Pump
Using DSMC

計劃編號：NSC 90-2212-E-009-055

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：崔燕勇 國立交通大學機械系教授

一、中文摘要（關鍵詞：渦輪分子幫浦，直接模擬蒙地卡羅法）

真空系統廣泛的為各種工業製程所需要，此包括了現今蓬勃發展的半導體製造業，而此系統的動力來源即為真空幫浦，在各式真空幫浦中渦輪分子幫浦 (TMP) 因其流量大、工作壓力低、及可靠度高而廣為半導體製造業所採用，過去對於真空幫浦的流場分析大多是採用 Kruger 的蒙地卡羅法，但此法僅適用完全分子自由流，且不能顯示流場狀態，本研究採用直接模擬蒙地卡羅法 (DSMC) 探討在不同壓力下此幫浦內的流場，工作壓力範圍包括過渡流及分子自由流，除了單級葉片，主要另考慮兩級及三級葉片。結果顯示當壓力升高至過渡流及黏流範圍時，幫浦性能快速下降，同時蒙地卡羅法發展的理論分析並不完全適用。

英文摘要：(Keywords：Turbomolecular pump, DSMC)

Vacuum systems have been widely employed in a variety of industry manufacturing processes, including the IC manufacturing which have been flourishing in the past years. In vacuum systems the vacuum pump plays the role of a power plant. Among a variety of vacuum pumps, the turbomolecular pump (TMP) is the most

popular in the IC industry because of its large pumping speed, low working pressure, and high reliability etc. In the past, the Monte Carlo method of Kruger is the most widely used to analyze the flow in the turbomolecular pump. However, this method is only applicable to the free molecular flow regime and it cannot be used to predict the flow field. Therefore, the direct simulation Monte Carlo method (DSMC) is adopted to investigate the flow field in the pump under different pressure levels. The working pressure range will include both the transition flow and the free molecular flow regimes. In addition to the single stage blade, two-stage and three-stage blades will also be under investigation. The results show that when the back pressure is increased up to the transition or viscous flow regime, the performance of the pump declines rapidly. Thus, the theory originated from the Monte Carlo method of Kruger is not adequate.

二、計劃緣由目的

真空技術的應用極為廣泛，從較早期的燈泡暨真空管工業、食品包裝，材料的冶鍊到目前台灣最蓬勃的半導體製造業都需要不同程度的真空度。在半導體製造中大多處於高度真空狀態下，為達到此高真空現今應用

最為廣泛的就是渦輪分子幫浦。渦輪分子幫浦具有大流量，高壓縮比，較低的工作壓力，及工作穩定性高等優點，其工作壓力範圍約為 $10^{-2} \sim 10^{-10}$ Torr，此相當於 Knudsen number (Kn) 介於 $0.1 \sim 10^7$ 。一般而言，當 $Kn < 0.1$ 為連續流，也就是傳統的連續流，其運動可由 Navier-Stokes 方程式決定， $Kn > 10$ 稱為自由分子流， $0.1 < Kn < 10$ 為一介於連續流與自由分子流間之過渡流。由以上討論可知，渦輪分子幫浦之工作主要在過渡流及自由分子流範圍內，而其流體的運動皆無法由 Navier-Stokes 方程式描述。

在過去對於過輪分子幫浦內的流場分析，主要係以 Kruger 及 Shapiro 所提的傳輸機率之概念，利用蒙地卡羅法計算分子穿過葉片間流道的機率，其後有 Sawada 的分析法，Chu 及 Hua 的統計力學法，Wu 的矩陣機率法等。然而上述之方法最大缺點在於只能適用於完全自由流的範圍，因其假設中分子間的碰撞被忽略，因此對於過渡期之分子流無法適用，此外這些方法並不實際計算流場的速度，因此無法觀察流場現象，雖然這些缺點可藉由解 Boltzman 方程式解決，但是此直接解法困難處在於碰撞項的處理，此外此方程式的獨立變數除了時間及空間，另外還包括速度，總共是七個變數，因此數值計算的負荷異常龐大。本計劃以 DSMC 法探討渦輪分子幫浦，在過去的研究對此幫浦大多侷限於單級葉片的研究，而本研究將直接探討在多級葉片時的流場及其效能，並將探討不同工作壓力的影響，此壓力範圍包含完全自由及接近連續流的範圍。

三、研究方法

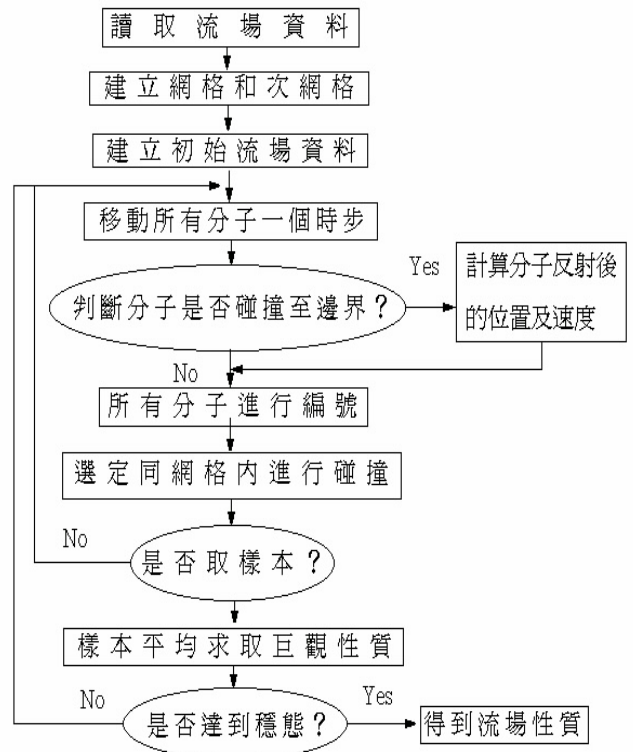
DSMC 法主要是利用少量的模擬分子代表一群位置及速度相近的氣體分子，如果知道每一模擬分子的位置、速度等，則可以求得巨觀的變量，其中基本的假設為模擬分子不佔空間，除了與其他分子或是壁面碰撞

外，不受其他分子影響，計算模擬分子的運動以 Lagrangian 法表示。

另外，在此法中一項重要的步驟是處理分子間的碰撞，首先將計算區域分割成網格系統，只有在同一格子內的分子才有相互碰撞的可能，此碰撞係假設為二元碰撞，亦即每次只有兩顆分子可能產生碰撞，網格的大小對於模擬的結果有很大的影響，一般格子大小必須小於分子的平均自由路徑，如此以保證巨觀性質的梯度在網格中不致太大。

除了分子間的碰撞，分子與壁面間的碰撞也要考慮，當分子碰撞壁面後造成反彈，一般分為兩種：鏡面反射和漫反射。由於實際表面相對於分子多為粗造面，因此大多係用漫反射模式。

有關於 DSMC 的計算流程可以表示如下：



四、結果與討論

1. 圖一及圖二顯示單級 TMP，當背壓小於 10^{-3} Torr (相當於 $Kn \approx 2.43$)，Kruger 的傳輸機率法與 DSMC 結果相近；但當壓力增加，已近連續流，傳輸機率法無法適用。另

圖二顯示 DSMC 結果與實驗結果有落差，此主要歸因於二維的假設。

2. 圖三及圖四顯示雙級 TMP 結果，同樣以 10^{-3} Torr 為臨界點，當與前述單級 TMP 比較時，其傳輸機率大幅降低，但以 M_{21} 降幅較大，因而雙級 TMP 之壓縮比增加。圖五及圖六為三級 TMP，其結果顯示與雙級 TMP 有相類似的結論。

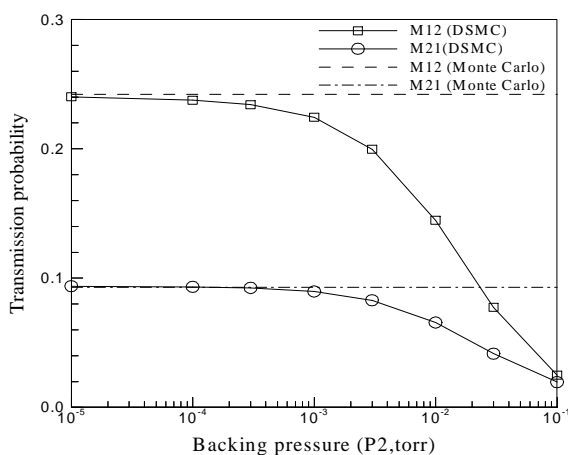
3. 圖七及圖八中之 CMR (Compression ratio multiplication method) 法是利用單級 TMP 之結果去推估多級 TMP 的最大壓縮比。當壓力小於或等於 10^{-3} Torr 時，CMR 推估值較 DSMC 值為低；但是當背壓增至 10^{-2} Torr 時，由於分子碰撞機率大增，即氣體黏滯性的影響，CMR 變得高估了壓縮比，此高估值隨著壓力的增加而有增加的趨勢。

五·參考文獻

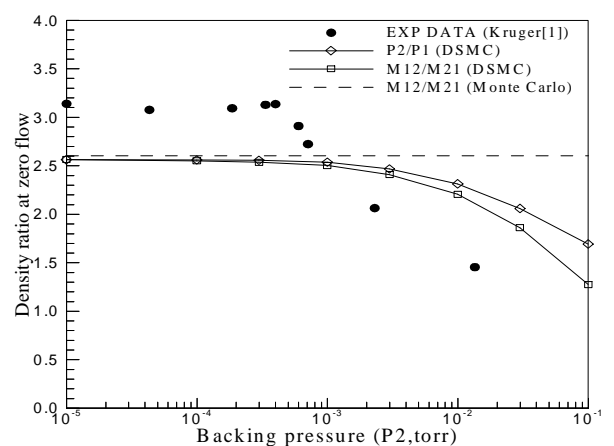
1. C. H. Kruger, The Axial-Flow compressor in the Free-Molecular Range, Ph.D Thesis, M.I.T., Cambridge, Massachuseets, 1960.
2. J. G. Chu and Z. Y. Hua, "The Statistical Theory of Turbomolecular Pump", Journal of

Vacuum Science and Technology, 20(4), pp 1101-1104, 1982.

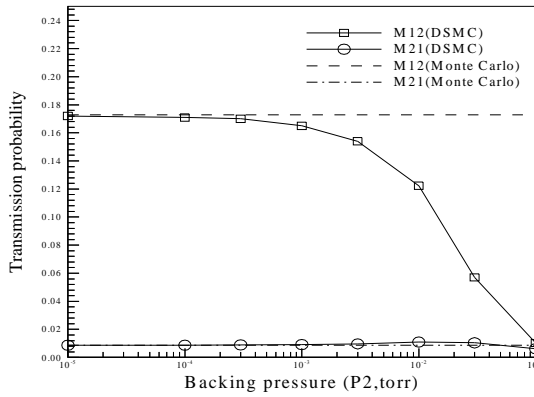
3. T. Sawada, M. Suzuki and O. Taniguchi, 'The Axial Flow Molecular Pump, I: On a Rotor with a Single Blade Row', 62(2), pp. 49-64, 1968.
4. T. N. Schneider, S. Katsimichas, C. R. E. de Oliveira, and A. J. H. Goddard, 'Analysis of Three-Dimensional Single Stage and Two-Dimensional Multi-stage Models of Flows in Turbomolecular Pump', Vacuum, 48(5), pp. 449-453, 1997.
5. G. A. Bird, Molecular Gas Dynamic and Direct Simulation of Gas Flow, Oxford, University Press, London, 1994
6. [9] 中山康司，"渦輪分子浦之數值模擬"，國立台灣大學應用力學研究所碩士論文，1998
7. [10] 張郁雯，周榮源，"渦輪分子幫浦單級二維流道之直接模擬蒙地卡羅法計算"，真空科技，12(1)，pp. 7-15, 1999



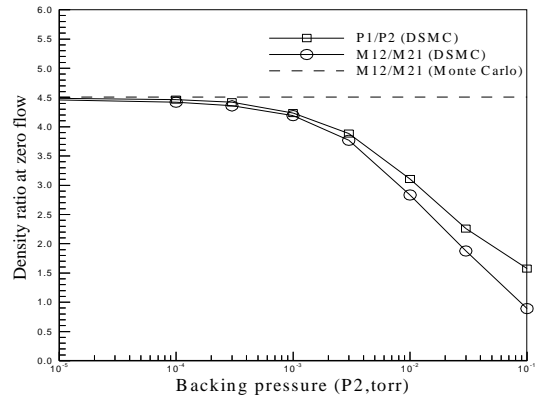
(圖一) 單級 TMP 在不同的背壓下 DSMC 與蒙地卡羅法求得的傳輸機率的比較 (最大壓縮比)。



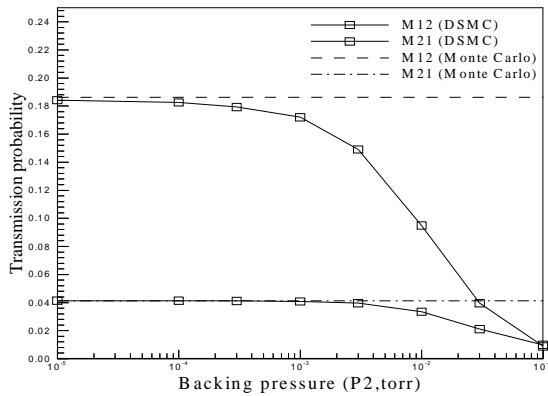
(圖二) 單級 TMP 在不同的背壓下 DSMC、蒙地卡羅法和實驗值的最大壓縮比的比較。



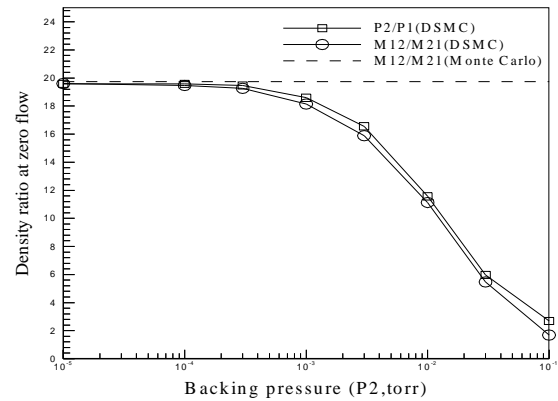
(圖三) 轉子-靜子形式的 TMP 在不同背壓下 DSMC 與蒙地卡羅法求得的傳輸機率的比較 (最大壓縮比)。



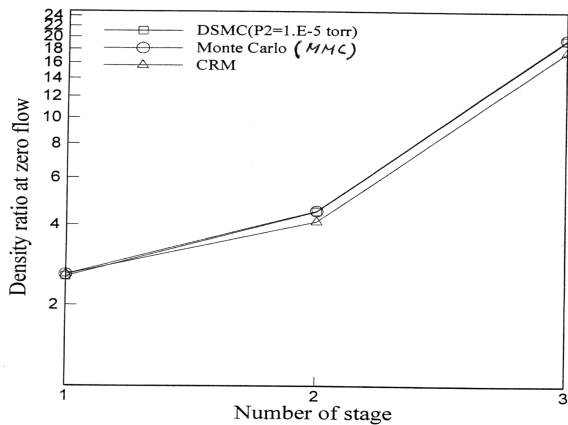
(圖四) 轉子-靜子形式的 TMP 在不同背壓下 DSMC 與蒙地卡羅法求得的最大壓縮比的比較。



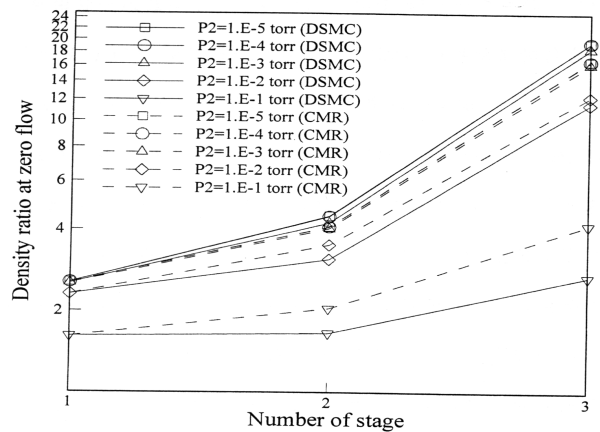
(圖五) 轉子-靜子-轉子形式的 TMP 在不同背壓下 DSMC 與蒙地卡羅法求得的傳輸機率的比較 (最大壓縮比)。



(圖六) 轉子-靜子-轉子形式的 TMP 在不同背壓下 DSMC 與蒙地卡羅法求得的最大壓縮比的比較。



(圖七) DSMC($P_2=10^{-5}$)、蒙地卡羅與 CRM 方法下級數與最大壓縮比的比較。



(圖八) DSMC 與 CRM 方法在不同背壓下級數與最大壓縮比的比較。