

「新型脈管制冷器研製」

Study on a new pulse-tube cooler design

計畫編號: NSC89-2212-E-002-148

執行期限: 民國89年8月1日至90年7月31日

主持人: 黃秉鈞

研究助理: 徐振邦 游鏡潔 孫秉文

執行機構單位: 國立台灣大學機械工程學系

一、中文摘要

本計畫旨在研製「新型脈管制冷器」,將傳統脈管制冷器之微孔或針閥元件改為可變流阻元件,流阻元件係利用汽車噴射引擎噴油嘴改裝而成,並開發一電子驅動電路來控制流阻變化。如此,可使脈管制冷器具操控性,達最佳操作之運轉。

關鍵詞: 冷凍機; 冷凍空調; 脈管冷凍機

Abstract

A new pulse-tube refrigerator using a variable-resistance element is developed in the present study. The variable-resistance element is designed using the oil jet device for automobile engine. An electronic device is designed to provide a proper input signal to the element in order to obtain a flow resistance for the pulse-tube refrigerator. The controllability and performance of a conventional pulse-tube refrigerator is thus improved using the present innovation.

Keywords: Refrigerator ; Pulse-tubecooler;
Refrigeration and air-conditioning

二、緣由與目的

我國位處亞熱帶地區,冷凍空調設備普及,每年生產窗型冷氣機約120萬台。目前有關冷凍空調技術的研發,除能源效率的考慮外,為因應HCFC(如冷氣機使用最普遍的R22)冷媒的逐步禁用,替代冷媒或非CFC冷凍空調技術的開發極為重要。採用氬氣為冷媒的制冷器(如史特林、脈管制冷器),深具發展潛力。

以史特林制冷器製成的低溫冰箱,有市場潛力,美國有兩家公司(Sun Power Inc. 與 Cryodynamics Co.)已開發出商用冷凍機[1]。事實上,史特林制冷器逐步廣泛用於軍事與航太方面的

紅外線尋標器或夜視系統,可達液氬(-200°C)溫度。主持人於八十一年度在國科會支助的計畫:「以系統動力學為基礎之熱力系統設計分析研究」(NSC81-0401-E002-587),以線性系統理論發展了一個史特林制冷機設計的流體網路分析法。爾後,在國防學術小組的支持下,與中科院合作,發展硬體與系統設計軟體[2-4]。

脈管制冷器(pulse-tube cooler)係後起之秀,近十年來技術進展神速,性能已接近史特林制冷器。微孔脈管制冷器(orifice pulse-tube cooler)係由冷頭與壓縮機兩大組件所構成,如圖一所示,以氬氣為工作介質。冷頭係由回熱器、脈管、微孔與蓄氣室所構成,回熱器係由金屬網充填於圓管而成,脈管則係一個空管;壓縮機主要由活塞與氣缸所構成,是制冷器的唯一動件。

由於脈管制冷器溫度可達 80K,壓縮機內任何潤滑油均會在壓縮氣缸產生油氣,並飛至冷頭結凍,阻塞管路,故壓縮機必須為無油式(或稱「乾磨潤」)。在顧及制冷器性能與運轉壽命的雙重要求條件下,便構成工程設計上的一項嚴厲挑戰。壓縮機也是脈管制冷器的唯一動件,其品質關係制冷器的壽命。主持人曾開發採「滑塊機構」的壓縮機,並發展陶瓷材質之氣缸,性能優越,MTBF 超過 2,000 小時。

微孔脈管制冷器的制冷原理主要利用熱聲現象(thermo-acoustic phenomenon),利用活塞往復運動產生壓力波與質量波,經連接管傳遞至回熱器,然後在脈管內產生往復運動現象,在冷頭地方產生流量波與壓力波的相位差,引起制冷現象[5]。微孔(orifice)與蓄氣室主要用來調節壓力與質量波的相位,採用微孔主要是構造簡單,但因製造與操作調整不易,大多數研究者均採用針閥(needle valve)來取代微孔,卻因此引起制冷器操作不穩現象。最近中國大陸學者改採對稱型噴嘴(symmetry nozzle)來取代微孔,結果發現不但可使制冷器穩定運轉,其性能也獲得改善,冷頭溫度下降[6]。

脈管制冷器之性能與微孔流阻、蓄氣室大小、

回熱器脈管設計、操作壓力、操作頻率有密切關係，其中微孔流阻之設計有最佳值存在。不論採用微孔、針閥、或對稱型噴嘴，均是一種固定式流阻設計。依據許多實驗顯示，在操作壓力、操作頻率固定下，脈管制冷器冷頭溫度會隨微孔或針閥之開度改變。因此，如果將微孔或針閥改採一種可變流阻之元件，並由電子控制器來控制其操作，使其流阻可以隨操作壓力、操作頻率來改變，則可使脈管制冷器一直維持在最佳狀況運轉。本計畫即依據此一創新構想，發展「可變流阻脈管制冷器」。

本年度計畫之研究重點如下：

1. 設計製作一個經濟又可靠的可變流阻元件。
2. 設計製作可變流阻驅動電路。
3. 找尋一可變流阻組合(包括不同脈波信號之類型)，使其產生之流阻與針閥相當。
4. 利用可變流阻組合，進行脈管制冷器之性能測試。

三、研究結果

1. 可變流阻與驅動電路硬體製作

本研究之可變流阻元件採用中華汽車噴射引擎所用的噴油嘴(如圖二)，型號MD319792。其開關頻率可達數十甚至數百Hz，又是量產之汽車零件，因此容易取得成本亦低。其流阻之改變，可透過一脈波信號來控制，其波型與脈管制冷器壓力波型如圖三所示。脈波之頻率 f_v 可以不同於脈管制冷器操作頻率 f_{op} ，藉由調整脈波之頻率 f_v ，可以產生不同流阻。

可變流阻本質上為一電磁閥，電控線圈部分有正負兩端，只要正負兩端電位差為12V以上，就可驅動使其為“開”，若不到12V則其為“關”。圖四為驅動電路示意圖，本計畫所利用的驅動脈波信號來源是一部個人電腦，當電腦經由DIDO卡送出“ON”或“OFF”的訊號，經由場效電晶體IRFP450，即可控制可變流阻呈現“開”或“關”的狀態。本計畫利用兩個參數來控制可變流阻脈波信號，分別為開關頻率(f_v)，與 Duty cycle(r_D)，兩者的關係見圖五。這相當於由個人電腦中送出一設定過的PWM(Pulse Width Modulation)訊號，即可透過此驅動電路來驅動可變流阻元件。

2. 可變流阻性能測試

為瞭解脈波信號 f_v 與 r_D 對流阻的影響，本計畫設計一個量測設備(如圖六)，利用排水集氣法測得流量(\dot{m})，再利用壓力計量得氬氣通過可變流阻元件時的壓力降(ΔP)。再以壓力差與質量流量的數學關係式

$$\Delta P = am^2 + bm \quad (1)$$

找出各操作條件下可變流阻壓力差與質量流量關係

的二次迴歸曲線，而流阻 R_v 即為壓力差對質量流量微分一次後的結果，亦即壓力差與質量流量關係圖(PQ圖)上的曲線斜率，流阻 R_v 與質量流量 \dot{m} 的關係式如下：

$$R_v = \frac{\partial(\Delta P)}{\partial(\dot{m})} = 2am + b \quad (2)$$

本計畫中我們做了針閥SS22RS2與可變流阻不同頻率與Duty Cycle下的流阻實驗，量測出一部份的PQ圖如圖七~九所示。由於考慮到氬氣在以不同方向通過可變流阻時由於流阻不同可能會對脈管制冷器性能有所影響，因此每組實驗都量測了正向與逆向壓力差與質量流量的實驗數據。

由實驗所得的PQ圖，我們可以發現可變流阻的一些特性如下：

1. 在可變流阻開關頻率為5Hz時，可變流阻的逆向流阻比正向流阻要略大，而在開關頻率為15Hz、30Hz、50Hz時，可變流阻的逆向流阻比正向流阻大了60%至90%。
2. 以可變流阻而言，當開關頻率越高時，其流阻值亦越高，當Duty Cycle值越高時，其流阻值亦隨之下降。
3. 就針閥SS22RS2與可變流阻的正向流阻比較，當針閥開度三轉時，其正向流阻約相當於可變流阻開關頻率為30Hz，Duty Cycle為50%時的正向流阻，而針閥開度四轉時，其正向流阻約相當於可變流阻開關頻率為30Hz，Duty Cycle為80%時的正向流阻。
4. 而就上述兩種情形時的逆向流阻比較，針閥三轉的逆向流阻值的約與可變流阻開關頻率為30Hz，Duty Cycle為50%的逆向流阻值相同，針閥四轉的逆向流阻值的約與可變流阻開關頻率為30Hz，Duty Cycle為80%的逆向流阻值相同。

3. 可變流阻脈管制冷器錐型機設計、製作

本計畫設計了五組可變流阻脈管制冷器。圖十代表的是Pt系列的硬體外型，這三部硬體是沿用台大余國誌論文[7]中所用的Opt3、Opt4、Opt5，在此以Pt3、Pt4、Pt5稱之，此三部硬體的差異僅在脈管長度有所差異；圖十一代表的是本計畫中研製的Npt系列的硬體外型，這兩部硬體外型與Pt系列的差異在於脈管與回熱器連接在同一軸上，與Pt系列脈管與回熱器並列的方式不同，而Npt3與Npt4這兩支硬體的差異也僅在脈管長度有所不同。其中詳細的硬體規格見表一。

4. 可變流阻脈管制冷器錐型機測試分析

脈管制冷器之性能測試設備如圖十二所示。本

計畫設計了以下三種可變流阻實驗，分別是以(1)隨機開關；(2)同步開關；與(3)壓力控制開關的方式操作。隨機開關(RVR)乃是指可變流阻的開關頻率(f_v)與Duty Cycle(r_D)與壓力波的相位無關；同步開關(SVR)乃是指可變流阻的開啟是根據熱端壓力波每個正弦波的週期起點作為判斷的依據；壓力控制開關(PVR)乃是指可變流阻的開啟是根據熱端壓力波極值的百分比作為判斷的依據。本計畫旨在探討以上三種不同的可變流阻開關訊號對脈管制冷器性能的影響。

測試方法是使用五組可變流阻脈管制冷器，利用三種不同的開關方式，改變 f_v 與 r_D 去量測冷頭的最低溫度。

而根據實驗結果得到以下的結論：

- (1) 在 RVR 與 SVR 時，可變流阻開關頻率為 30Hz 時有較佳的性能，其 $T_{L\min}$ 較其他開關頻率為低(見圖十三、圖十四 Npt4 之實驗結果)；而 Duty Cycle 值越大， $T_{L\min}$ 亦越低。這點與以往針閥有一個最佳開度的情形不同。原因可能為可變流阻開關與通過可變流阻的質流量有極為密切的關係，當可變流阻關閉時因無質流量通過而使壓力波與質流量的乘積為零，而影響制冷效果。
- (2) 除了 SVR-Pt3 這種機型測試結果較 RVR-Pt3 的測試結果為差外，其他都是 SVR 可變流阻脈管制冷器性能較 RVR 可變流阻脈管制冷器為佳。原因可能是由於在同步開關(SVR)的操作條件下，壓力波與流量波相位配合比隨機開關(RVR)的操作條件下的相位配合為佳，但兩者 $T_{L\min}$ 上的差異皆在 10K 以內，尚屬可接受的誤差範圍內，所以隨機開關與同步開關兩者就制冷效果而言差距不大。但在硬體架設方面，由於同步開關可變流阻脈管制冷器由於需要壓力訊號輸入作為參考，所以較隨機開關可變流阻脈管制冷器的硬體複雜，因此在實用上，隨機開關可變流阻脈管制冷器應是較佳的選擇。
- (3) 如圖十五是五支硬體經由壓力開關控制(PVR)可變流阻脈管制冷器測試的實驗結果。當壓力開關的控制以脈管出口壓力極值的 50%為參考時，可達 $T_{L\min}$ 的最低值；Npt 系列與 Pt 系列的機型中，在脈管元件較長的 PVR-Npt4 與 PVR-Pt3 兩種機型較同系列其他機型的 $T_{L\min}$ 為低；但是調整參考壓力極值的百分比做為開關控制的依據對 $T_{L\min}$ 的影響並不大，差距皆在 15K 以內。從實驗結果可以發現，當以壓力波極值的 50%作為可變流阻開關的依據 $T_{L\min}$ 為最低。在與同步開關比較方面，PVR-Pt3、PVR-Pt4 與 PVR-Npt3 的最低溫皆比 SVR-Pt3、SVR-Pt4 與 SVR-Npt3 要低 10K 以上，因此以壓力極值做為開關參考依

據的控制方式可得到較佳的制冷效果。

5.可變流阻脈管制冷器的最佳設計方法

以壓力控制開關來控制可變流阻可得到較好的結果，但以便利性與實用性而言，無須以脈管熱端壓力作為參考的隨機開關可變流阻脈管制冷器將是最具潛力的方向，也較容易自動化。

而就整體硬體設計而言，就本研究的經驗，若整體系統中壓縮機本身活塞與氣缸壁間的洩漏能減少至最低、連接管能盡量縮短、回熱器壓降能降低卻不失儲冷效果、脈管管壁越薄且內壁光滑，整體制冷效果會因為這些因素的改進而更好。更為重要的在於回熱器與脈管尺寸的搭配與設計，就 Npt 與 Pt 系列而言，脈管長度越長似乎制冷效果越佳，而就這兩系列的比較，脈管的內徑較小效果也較好。回熱器設計上，雖然 Pt 系列採取三段的填充方式，可有效地利用儲冷段而降低其他部分的壓降。但 Npt 系列係採內徑較大金屬網片單段填充的方式，似乎可減少填充的片數亦能達到相等的效果，而減少壓力波幅的下降。綜合以上的觀察，若以回熱器內徑為 12mm 採 200mesh 的不鏽鋼金屬網填充 700 片，而脈管以內徑為 7.4mm，長度為 120mm 當成硬體設計參考，可能得到更好的制冷效果。

此外，針對 RVR、SVR、PVR 三種機型，前兩者最佳操作條件應是可變流阻開關頻率為 30Hz，Duty Cycle 值為 80%時；而 PVR 機型最佳操作點乃是在以壓力波極值的 50%做為開關參考依據；壓縮機的操作頻率則要根據微孔脈管制冷器的測試結果作為參考，以本實驗硬體的尺寸範圍內，10Hz 似乎是壓縮機最佳操作的頻率。

四、結論

本年度計畫已完成可變流阻脈管制冷器的研製，以汽車引擎中的噴油嘴當作可變流阻元件，經過測試效果合乎預期，並經由設計出的可變流阻驅動電路，可以很機動的改變流阻。

在可變流阻開關訊號方面，隨機開關(RVR)將是最具潛力的方向，也較容易自動化，而第二年度起的控制系統研發時，採取 RVR 將是較適當的選擇。

在可變流阻性能測試方面，雖然可變流阻脈管制冷器的性能比微孔脈管制冷器稍差，但可變流阻的操控性，優於微孔脈管制冷器中的針閥調整，有其實用上的價值。

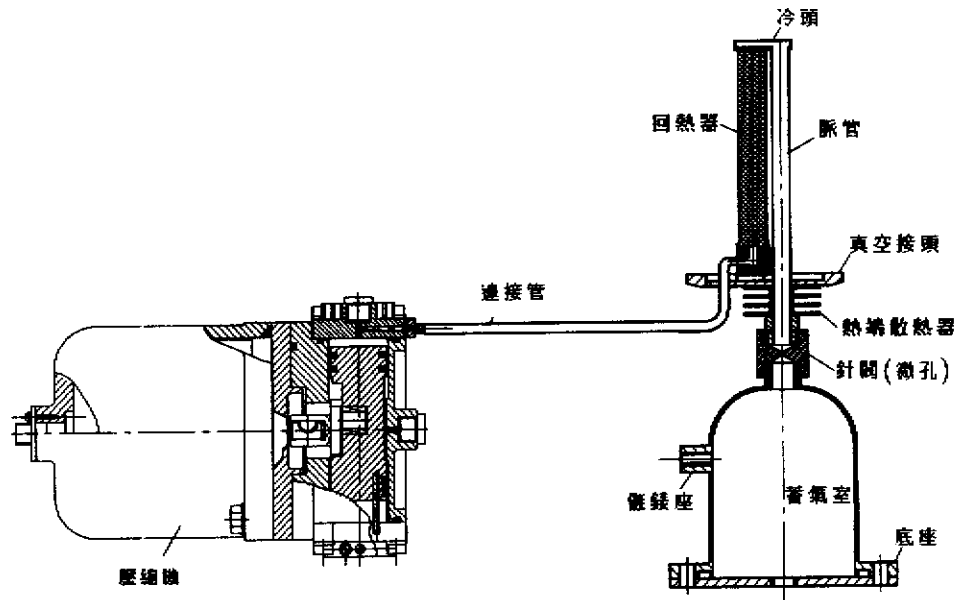
第二年度起的控制器研發，將以可變流阻的頻率與 Duty cycle 當作輸入，去控制當作輸出的冷頭溫度。其中忽略了流阻變化對系統的影響，可簡化系統的複雜度。未來將以控制器研發為主，以期能使得系統有最佳的操控性，可使可變流阻脈管制冷器維持在最佳狀況運轉。

參考資料

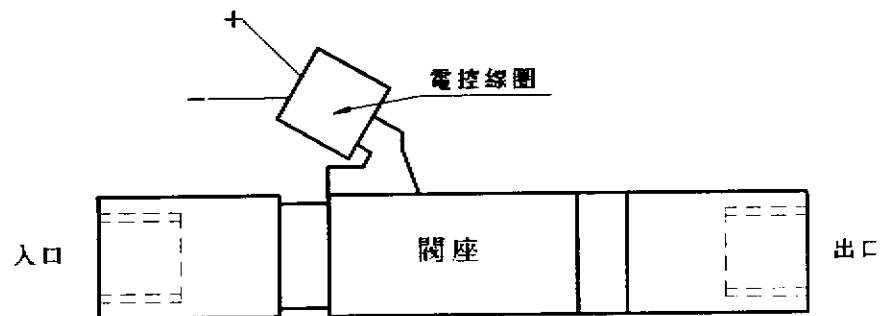
- [1]李國富：“氦氣制冷前景廣闊”。中國制冷學報，Vol.57, No.4, pp.28-31(1996)。
- [2]黃秉鈞：“小型閉式致冷器系統整合分析及設計軟體研究開發”。國防學術小組專題計畫報告，計畫編號 CS84-0210-D-002-027, (1995)。(計畫主持人)
- [3]黃秉鈞：“史特林閉式致冷器系統整合設計分析研究”。國防學術小組專題計畫報告，計畫編號 CS83-0210-D-002-011, (1995)。(計畫主持人)
- [4]B.J.Huang and C.W.Lu: “Split-type free-displacer

Stirling refrigerator design using linear network analysis”. *Cryogenics*, Vol.36, No.12, pp.1005-1017(1996).

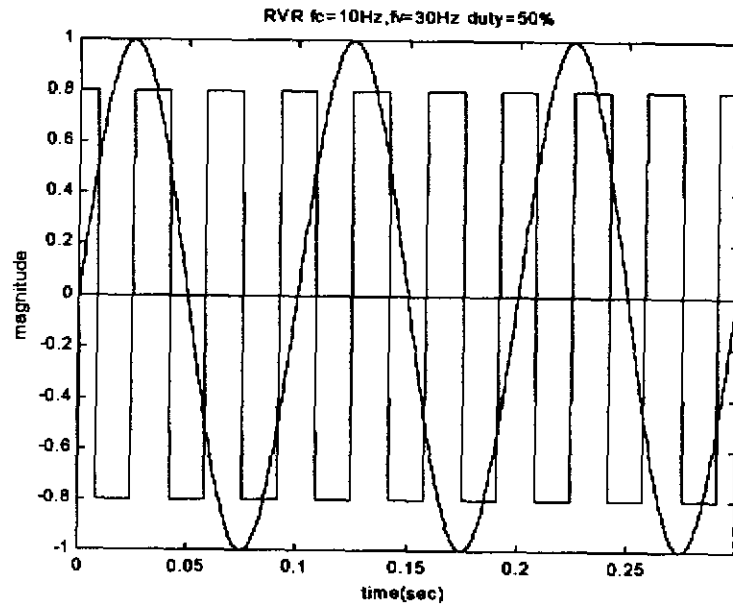
- [5]B.J.Huang and M.D. Chuang: “System design of orifice pulse-tube refrigerator using linear flow network analysis”. *Cryogenics*, Vol.36, No.11, pp.889-902(1996).
- [6]Luwei Yang, Zhou Yuan, Liang Jingtao and Zhu Wenxiu: “Analytical study of the performance of pulse tube refrigerator with symmetry-nozzle”. *Cryogenics*, Vol.39, pp.723-727(1999).
- [7]余國誌：“微孔脈管致冷器性能改善研究”，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，1997



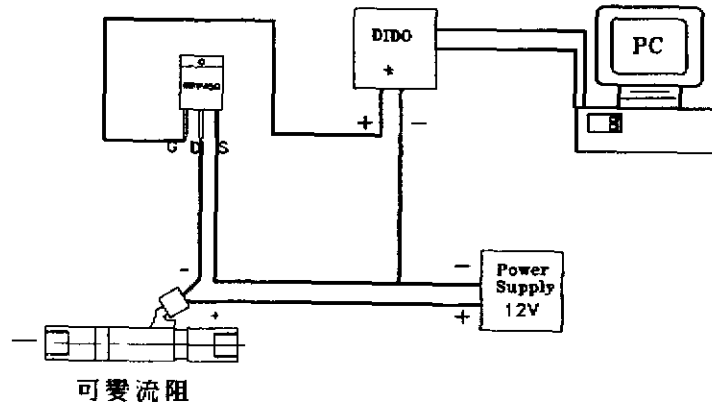
圖一 微孔脈管制冷器



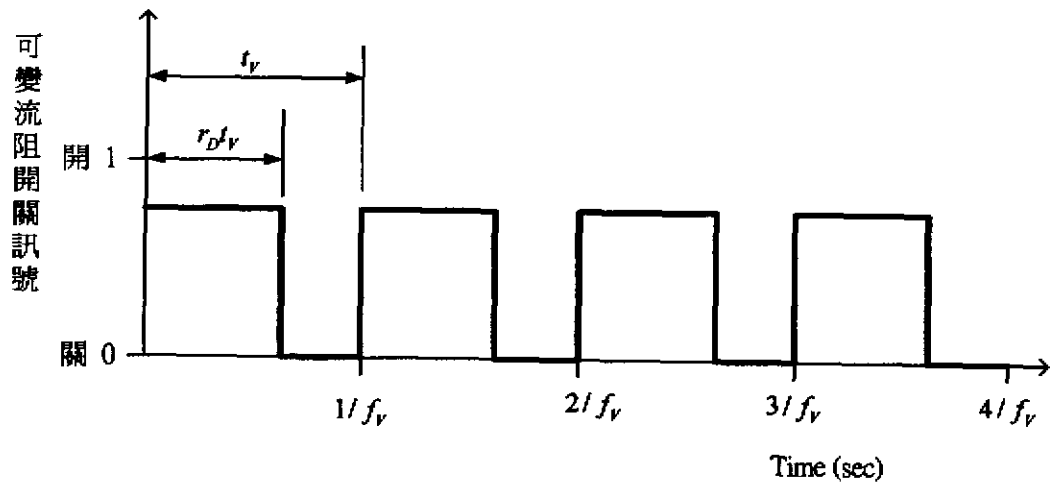
圖二 噴油嘴(可變流阻)構造圖



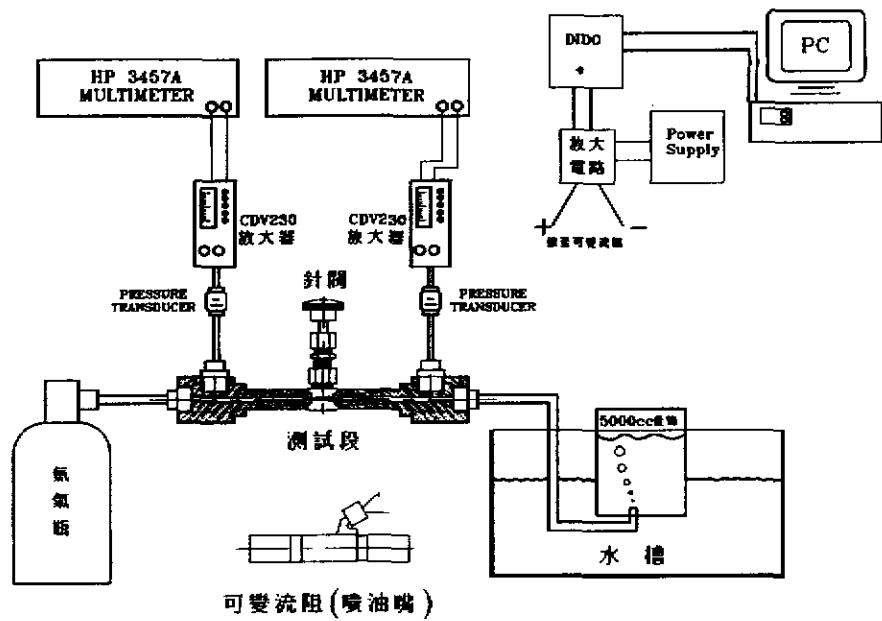
圖三 輸入可變流阻元件之脈波信號



圖四 可變流阻驅動電路

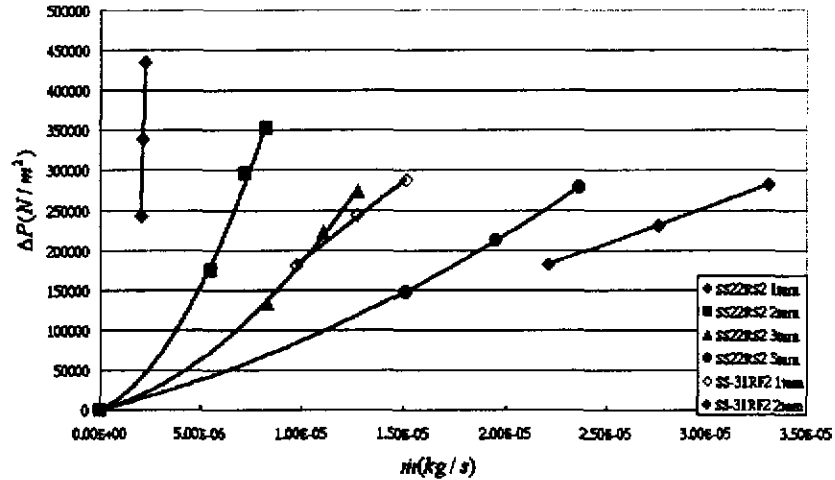


圖五 可變流阻開關訊號



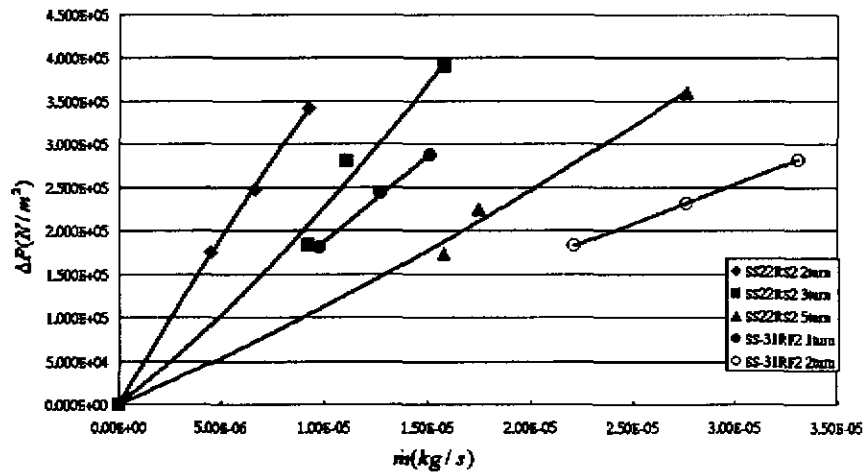
圖六 可變流阻實驗設備

針閥 SS22RS2 (正向流阻)

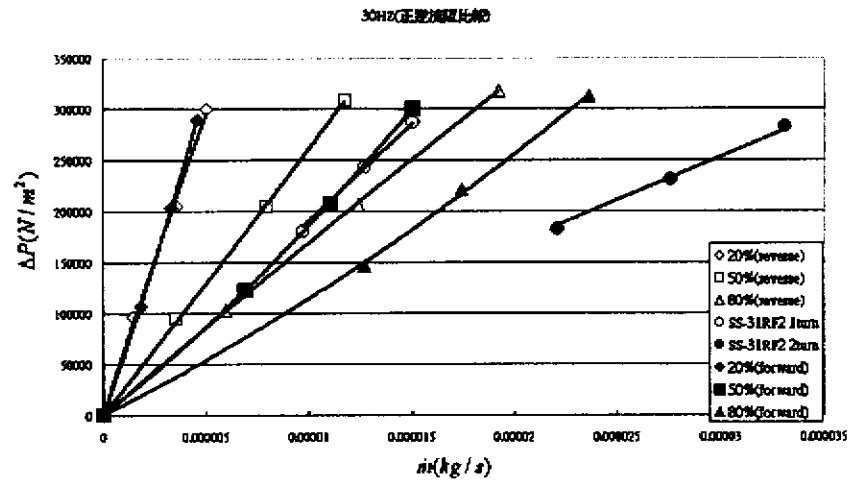


圖七 針閥SS22RS2，正向流阻實驗

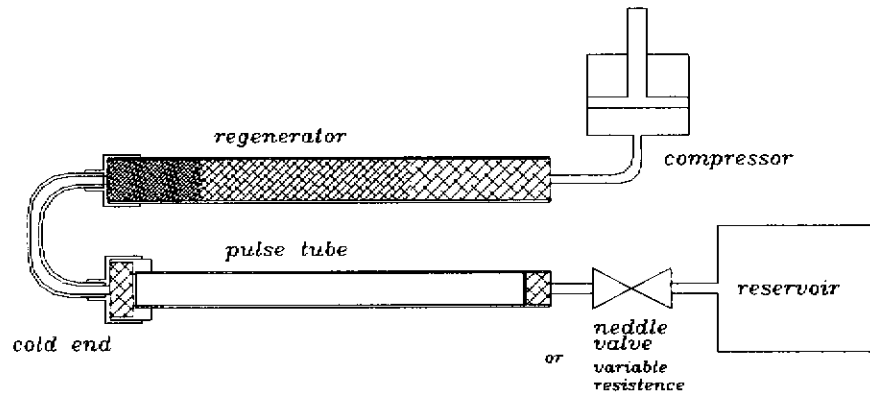
針閥 SS22RS2 (逆向流阻)



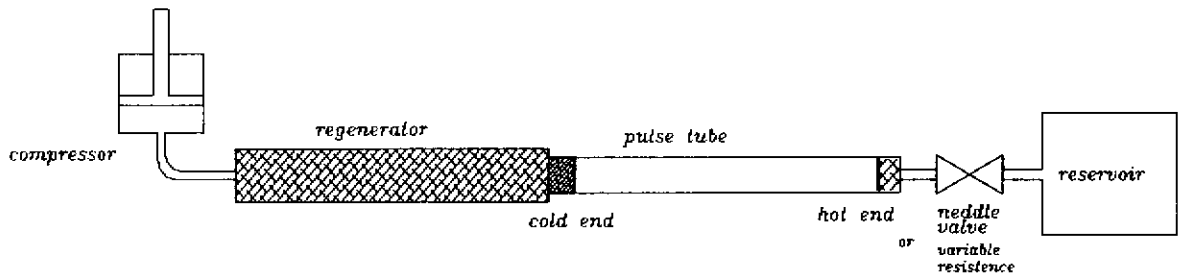
圖八 針閥SS22RS2，逆向流阻實驗



圖九 可變流阻開關頻率30Hz，正逆流阻比較



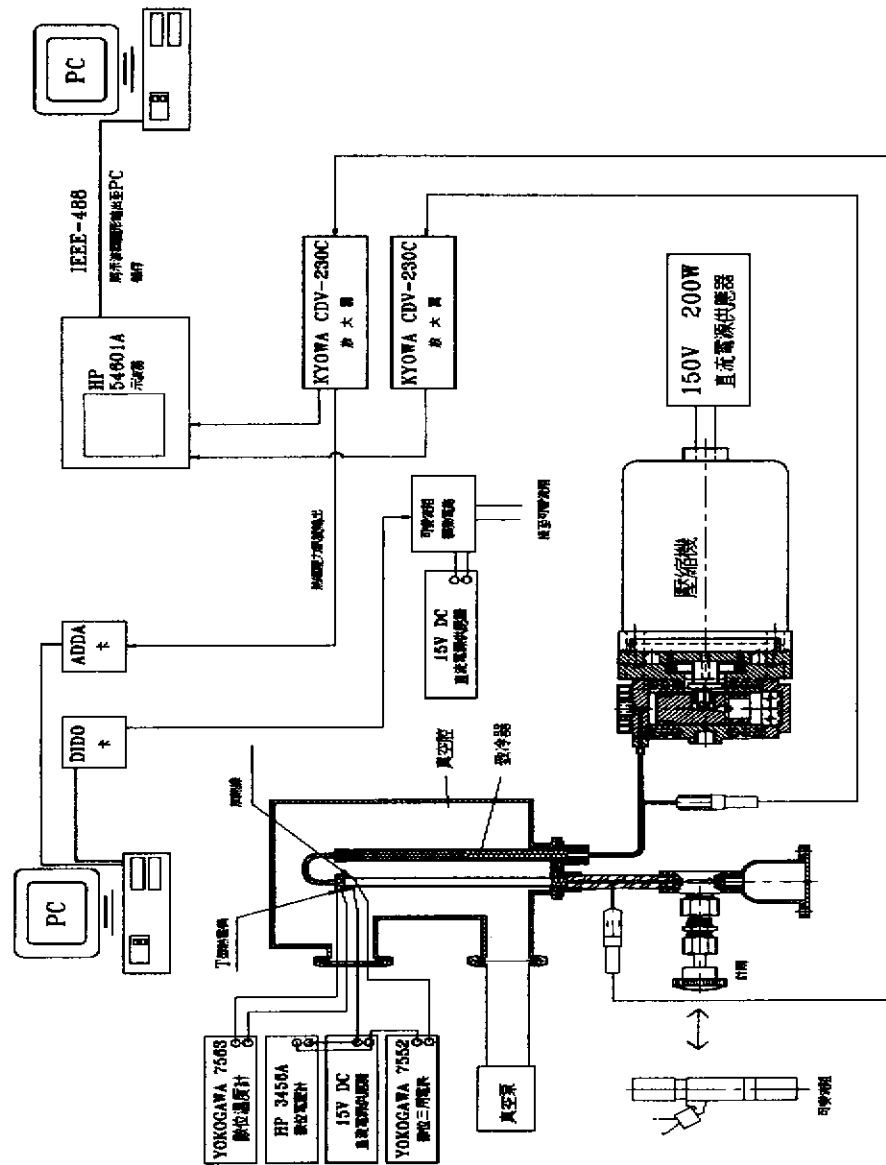
圖十 Pt 系列脈管制冷器硬體外型



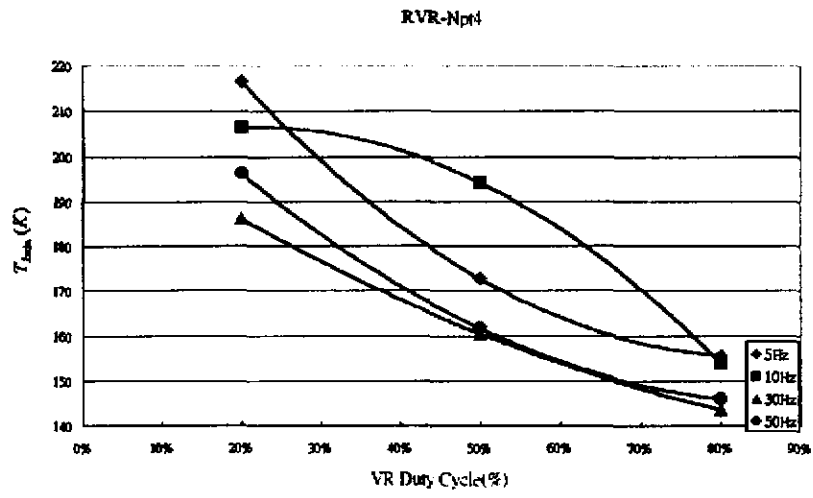
圖十一 Npt 系列脈管制冷器硬體外型

TYPE	壓縮機	回熱器	冷頭	脈管	熱端	SS22RS2 turns	Reservoir
Opt3	16cc	φ9mm 110mm 400mesh 180layers 200mesh 700layers 150mesh 400layers	φ2mm 3cm 100mesh 20 layers	φ7.4mm 5.6cc 130mm	100mesh 20layers	3turn 4turn 6turn	80cc
Opt4	16cc	φ9mm 110mm 400mesh 180layers 200mesh 700layers 150mesh 400layers	φ2mm 3cm 100mesh 20 layers	φ7.4mm 4.73cc 110mm	100mesh 20layers	3turn 4turn 6turn	80cc
Opt5	16cc	φ9mm 110mm 400mesh 180layers 200mesh 700layers 150mesh 400layers	φ2mm 3cm 100mesh 20 layers	φ7.4mm 3.87cc 90mm	100mesh 20layers	3turn 4turn 6turn	80cc
Nopt3	16cc	φ12mm 70mm 200mesh 700layers	X	φ9mm 5.73cc 90mm	150mesh 80layers	3turn 4turn 6turn	80cc
Nopt4	16cc	φ12mm 70mm 200mesh 700layers	X	φ9mm 7.63cc 120mm	150mesh 80layers	3turn 4turn 6turn	80cc

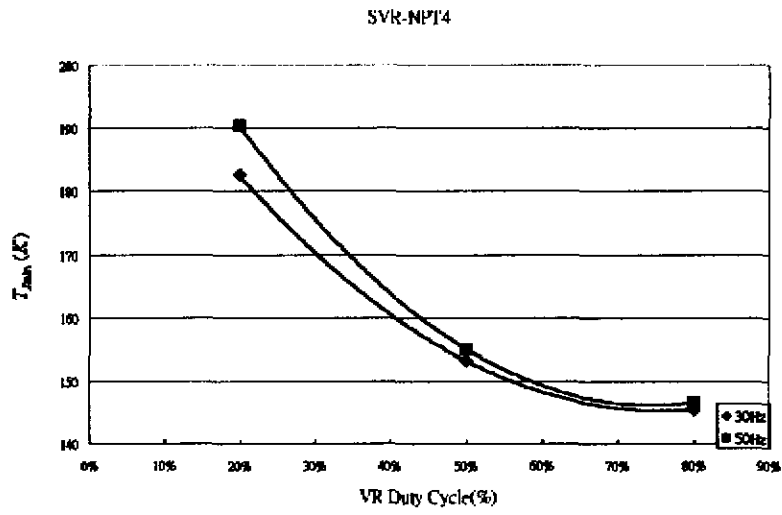
表一 五組脈管制冷器硬體規格



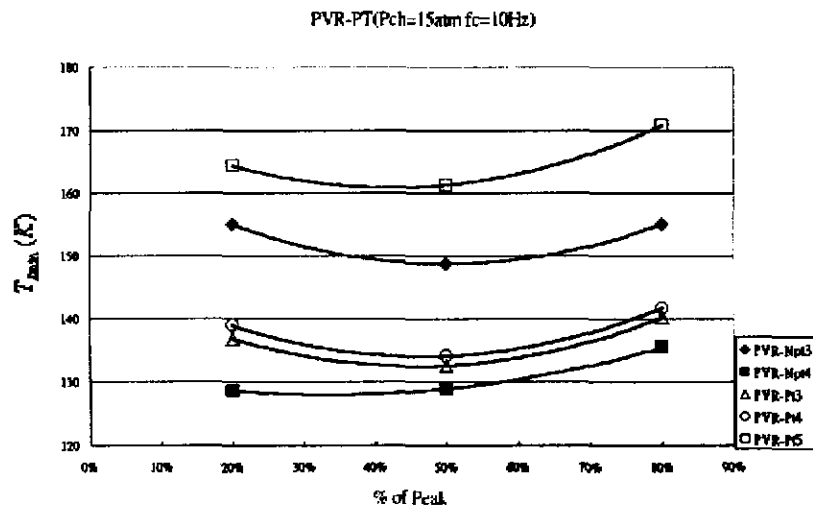
圖十二 脈管制冷器性能測試設備



圖十三 RVR-Npt4 實驗結果



圖十四 SVR-Npt4 實驗結果



圖十五 PVR 實驗結果