

熱 泵

Heat Pumps

原著者：R. D. Heap

譯述者：潘 家 寅



科技圖書股份有限公司

本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書名：熱 泵
原著者：R. D. Heap
譯述者：潘 家 寅
發行人：趙 國 華
發行者：科技圖書股份有限公司
 台北市博愛路185號二樓
 電話：3 1 1 0 9 5 3
 郵政劃撥帳號15697

七十年七月初版 特價新台幣65元

著 者 序

對於一個工業化的社會，能量是一種基本的必需品。而許多傳統的能源，其壽命均屬有限，尋求新的能源已頗為努力，且正以有效的供應做最佳的利用。

有時想到熱泵 (heat pump) ，又稱熱邦浦，也和太陽能與風車一樣同為能源。但熱泵所用的能量却往往比其他設備所用的更少。故對於熱泵有很大興趣，而且許多應用均屬技術上可行的，雖然目前在經濟上只有少數值得去做。能量的成本在上升，代價的相對性也在變化，許多有潛在力的應用性值得常常再評估。這就是本書之所以要協助可能會使用熱泵的設計師，專家，供應者，裝置者，以及使用者去做這種評估。

我寫這本“熱泵”當初專為那些建築師，勤務工程師或有能力的購買人，而且假定讀者對溫度，熱，以及能量的觀念均已熟悉。(如有疑問可參閱圖書館中的熱力學教課書籍。) 因我既非熱力學家也非冷凍工程師，假如我要強行侵入基本學說及裝備設計領域真是鹵莽與不智了，雖然充分瞭解各種取捨的考慮，以及可用的適當系統，我都會處理。如果裝備設計師認為本書尚屬有用的參攷書，就更好了。

在商業建築物及工業上利用以前，家庭中的應用也已考慮了，因一般均極直捷，且其原理在上述三種領域中已做若干引伸。為此已選擇一般材料，其必需的重複至最小程度，而同時也能反映出我個人經驗的偏好，這些都與建議使用熱泵的價值及重要性無關宏旨了。

前兩章包括一般的史話及學說的基本資料。第三章詳細討論蒸氣壓縮裝置，及第四章討論一般系統設計，尤其專門對於熱泵的空間加熱系統的參攷。第五至七章則涵蓋家庭的，商業的，以及工業的分別應用。以及第八章討論有關若干選擇熱泵系統之經濟的分析方法。全書以“經濟的”(意即與其他設資利益的比較)以及“值得做的”(

一種更主觀的價值判斷)條款言之,容有遺漏之處,蓋一種嚴謹的評估可能與評估人有關,猶如與應用有關是一樣的。

用於大多數熱泵的蒸氣壓縮機是複雜的,尤其在組件間之相互關係內有各種方式。所幸對於冷凍工業方面已有高度發展,在第三章中陳述該設備對冷凍工程師雖已熟知,但為希望能充分瞭解其工作的許多其他讀者亦已包括在內。

更深入詳述冷凍工程全部的景象,早已採用大多數容易理解而詳盡的資料,已在各種手冊中,及由“美國加熱,冷凍,與空氣調節工程協會”(The American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers,ASHRAE)逐年有規畫的登載。“空氣調節”(air-conditioning)一辭,乃嚴謹的意指所供應空氣之溫度,濕度及清潔度(temperature, humidity and cleanliness),往往失之於“空氣冷卻”(air cooling)之意,而在本書中設備裝置之使用不是“冷卻”便是“空氣調節”之謂,並無實用的嚴格定義了。

國際單位制,SI(Système Internationale d'Unités)的單位在本書中一貫使用之,雖然組合單位,如瓩-時(kilowatt-hour, kWh)常用於能量而不用焦耳(joule)表示之,因為這是早已瞭解而沿用的。

參攷本書中已刊載之論文很多,而且能使讀者及研究人士更深入專門的論題。此等參攷文獻在每章中以數字標明,在各章末一併刊出。至於一般教本,名稱,設備,指引,文獻調查,以及雜誌等均在本書末分別刊出。務須注意在本書中之任何構想的結論並不包涵專利保護之豁免,或可能免費使用。

感 謝

我要感謝我的服務機構“電力評議會”(Electricity Council) 給我協助與鼓勵，也要感謝研究中心的主任 A. T. Churchman 博士，以及所有在 Capenhurst 及在 London 的同事們，他們曾提出構想及有用的指教與批評。在本書中發表的意見是我個人的，而無需代表我的服務機構的觀點及政策。這種性質之書籍無可避免是不完備的，但若有任何差錯或誤解，我應樂於關注。

我必需感謝那些提供資料及圖片標題的製造商及其他人士，尤其要感謝 Joan Hughes 氏的準備工作及抄錄。內子 Wendy 女士則不僅支持我而負擔生計，而且也參加編纂，起草，及準備參攷資料。

R. D. Heap.

Ellesmere Port

譯 者 序

很奇怪好像「熱泵」這名辭對我們很陌生，其實在世界上各科學先進國家已早在着手研究且均在應用，尤其許多強烈依賴進口石油的國家如瑞典、丹麥、以色列、日本、南美及英美法等國，在家庭用熱泵不是在發展財源上便是更顯著的津貼制度下接受政府的支持。熱泵是一種能由溫度之來源吸取熱後，且可成爲較高溫度之有效熱源。例如一工廠由於水中泵取熱的提供空間加熱之用，及由戶外空氣中泵取其熱以加暖住屋或商店，甚至於由辦公廳員工身上的體熱及游泳池或大會堂中空間之熱能均可做冷卻之用。總之假如能源充分及價格不需重視時則使用熱泵就無此不要了，然則能源有嚴格的採用性及騰貴的價格時，則熱泵往往能對於一特定的加熱程序可節省能量的需要。假如能由太陽採取能量做爲熱泵之熱源，則應用於種種加熱程序上更爲理想了。自然在經濟上分析中要考慮各種發展的因素。不過一般人對於看似新奇的事物過份熱衷，而對於值得去做的應用在慢慢發展的觀念下却做過度的猶疑。

反觀我台灣省，煤炭石油蘊藏並不豐厚，而工業水準已躋入開發國家之林，能量之消費日益龐大。故來源與節流均需嚴肅的考慮，而實踐之途二者均需多元化。開源方面核能之開發需儘量利用台省特產之獨居石提製鈾，以發展孳生反應爐，（又稱增殖反應爐），此事已由泰勒博士（氫彈之父）做此建議。但恐非短短十年可辦。故當局仍需先做短程之綢繆，如購進小宗石化燃料及與他國合作探勘開發礦藏之事業種種措施。但發展熱泵則短期內便可以他國之成功範例爲借鏡立即進行。因發展此事間接的必須實踐「保存能源」之舉，即所謂改善熱的絕緣是最經濟的，對於使用熱泵以提供程序熱，其主要潛能範圍乃在工業中，在其中使用大量的水爲該程序之一部份，諸如食品及

日常用品工業，造紙工業，紡織工業，紡織處理廠，化學工業，金屬加工等之廢熱均可利用。此外如群眾有「能量的意識」，自動節約，且在不影響任何生活習慣上的不便，即可節省全國總能量的20-30%，如美國所調查之結果。（參見拙譯「明日之能源」）。如此則開源與節流雙管齊下，則國家必更快速步入康莊大道。

譯者於陽明山麓

民國七十年五月

目次

著者序

譯者序

第一章 緒論

1-1 定義	1
1-2 經濟學	2
1-3 史話	3
1-4 研究與發展	8
參考文獻	9

第二章 學說的原理

2-1 空氣循環機械	12
2-2 蒸氣壓縮循環	13
2-3 吸收循環	18
2-4 熱電熱泵	19
2-5 其他型式的熱泵	21
參考文獻	21

第三章 蒸氣壓縮熱泵

3-1 冷媒	23
3-1-1 冷媒之選擇	26
3-2 壓縮機運轉	29
3-3 壓縮機	32
3-3-1 容量控制	36

3-4	熱交換器	36
3-4-1	設計之討論	39
3-5	風扇與泵	40
3-6	管線與接頭	43
3-7	冷媒流量之控制	45
3-8	儲液器及中間熱交換器	47
3-9	除霜	48
3-9-1	除霜控制	51
3-10	其他控制	52
3-11	全部設計之樂觀性	54
3-12	可信賴性	56
3-13	標準與規格	59
3-13-1	美國標準與規格	59
3-13-2	歐洲標準與規格	59
	參考文獻	60

第四章 系統設計討論

4-1	一般討論	64
4-1-1	熱源	64
(a)	戶外空氣	64
(b)	水	64
(c)	地熱能	66
(d)	土壤	66
(e)	廢熱的回收	67
4-1-2	熱儲存	68
4-1-3	電力供應	70
4-2	空間加熱系統 (即暖房系統)	71
4-2-1	熱之分配	72
4-2-2	氣候對加熱系統設計的影響	73

4-2-3 “自由”熱	74
4-2-4 舒適的考慮	76
4-2-5 噪音	77
4-2-6 補助加熱	80
參考文獻	84

第五章 家庭用熱泵之應用

5-1 空間取暖	88
5-2 一種直捷的熱泵裝置的性能實例	90
5-3 熱泵與太陽能加熱	94
5-4 較大住宅單位之暖房	99
5-5 水之加熱	100
5-6 脫潮濕及乾燥	102
5-7 食物儲存	103
5-8 家庭游泳池	104
5-9 家庭應用之總結	105
參考文獻	105

第六章 在商業及公共建築物中之應用

6-1 巨大建築	109
6-1-1 集中系統	109
6-1-2 部分整體系統	114
6-1-3 非集中化密閉管線系統	114
6-1-4 單位模體，外源熱泵	116
6-2 商店與俱樂部	118
6-3 休憩中心及娛樂場所	121
6-3-1 室內游泳池	121
6-3-2 戶外游泳池	122
6-3-3 溜冰場	125

6-4 其他商業應用	126
參考文獻	127

第七章 工業的應用

7-1 回收熱的供應空間與水之加熱	130
7-2 回收熱的供應程序之加熱	131
7-3 對於溶液濃縮與蒸餾潛熱之回收	133
7-4 乾燥	134
參考文獻	137

第八章 經濟的分析法

8-1 要考慮的因素	139
8-2 成本 - 有效性之傳統分析	140
8-3 能量分析	143
8-4 系統的品位	144
參考文獻	146

第一章 緒論

1-1 定義

熱泵是一種能由溫度之來源吸取熱能且可成爲較高溫度的有效熱能。這就含有設計若干利用較高溫度熱能的意義了，故熱泵與其他類似的冷凍與空氣調節裝置不同，在這些後者裝置中是將較高溫度的熱能放出視爲廢熱棄去。熱回收，熱泵，以及空氣調節三者間之限界往往不很明確。只有熱回收情況中回收熱之溫度逐漸升高的設備才視爲熱泵的應用，空氣調節只有在它提供一熱源做爲有用之供應時才與熱泵有關聯。熱泵應用有兩種簡單實例，即在一工廠中由冷水中泵取熱以提供空間加熱之用，及由戶外空氣中泵取其熱是加暖住屋或小商店。這些應用是值得去做的，因爲操作此熱泵所需之能量只是提供總加熱能量中之一部分而已。

任何熱泵之基本組件均爲熱交換器 (heat exchangers)。透過此器熱能被吸取且成爲可採用的熱能 (圖 1-1)。此等熱交換器間之各種

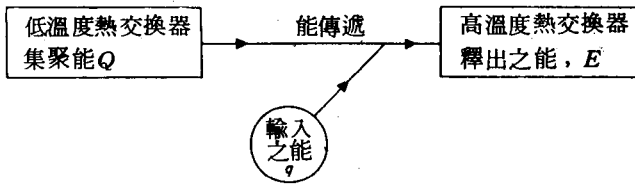


圖 1-1 基本的熱泵觀念

泵取熱的方式在第二章中敘述，包括由一具電力馬達，化學的吸收作用，氣體壓縮，以及熱電方法之將蒸氣壓縮。所有此等方法均有一個共同的需要即輸入能量（機械的，電的，或熱的）使之運轉。

造成有效用的能量 (E) 與運轉所用之輸入能量 (q) 之比率即熱泵效率之衡量。此效率稱謂“性能係數” (coefficient of performance) , “加熱係數” (coefficient of heating) , 往復熱效率” (reciprocal thermal efficiency) , “性能比率” (performance ratio) 或“性能能量比率” (performance energy ratio) 。而最普遍使用的名辭是“性能係數”或縮寫為“c.o.p.”。又往往用一個縮寫的字母“h”(即 heating) 以區別類似的對冷卻設備的命名。因冷卻效果 (cooling effect) , Q , 與能量輸入 (energy input) , q 之比率, 即 Q/q 。一般言之, 本書中之“c.o.p.”則用於 E/q 之意, 亦即操作的設備其熱能造成的有效性與總輸入能量之比率。故欲一具熱泵是有效的就必須有一個過剩的單位 c.o.p. 而且 c.o.p. 愈大則效能愈高。透過小的溫差用巨大的機械泵抽, 5 或 6 之 c.o.p. 值是辦得到的, 而且即使小機械用戶外空氣為熱泵也可以有 2 與 3 之間的 c.o.p. 。

1-2 經濟學

熱泵在能量一項上是有效的, 但未被廣泛使用。主要理由是與已建造的其他設備相比較是成本較高些。爲了任何特殊的應用熱泵務須與其他系統就其貢獻上的優點比較評估之。評估必須依據其他系統所用各種燃料之不同效率, 及總成本, 包括資本與維護費用在內。

往往, 可選擇的系統會更熟知及價廉, 因此熱泵所節省的能量必須與較高資金成本及某些不確定的維護費用相均衡。傳統的分析示明若干熱泵應用顯然是經濟的, 但在許多情況下則需作廣泛的判斷。至於在第八章中則有關於能量節約計畫的經濟分析, 其中對於各種所設計的能源節約計畫只是一種簡單的方法。

無論與能量供應有關的經濟因素如何迅速變化。熱泵的應用範圍已再評估, 燃料成本每次增加, 則此範圍亦愈增大。製造者的預言及國家的調查均指出在 1980 年代熱泵行銷將迅速增加, 而且好像能量價格的上漲比財富更爲快速。留待觀察在廿世紀最後的四分之一歲月中熱泵是否會在國家能量經濟上扮演重要的角色, 或是熱泵將被其他能減低能量需求的技術所壓倒。無論在其中任何一種情況中將持續需

要評估熱泵的存在性。就歷史背景而言，若干感觸是要排除兩種障礙：對於看似新奇事物過份熱衷；及對於值得去做的應用已在慢慢發展的觀念却做過度的懷疑。

1-3 史 話

十九世紀中物理程序之瞭解在成長，因之對於泵抽熱能至一較高溫度的可能性發生興趣。焦耳氏 (Joule) 證明變更一氣體之壓力使其溫度起變化的原理，以及 Piazzi Smythe 教授或者是第一次用這原理設計過一具冷卻機器。湯姆生 (Thomson) 教授 (以後是 Kelvin 爵士) 則首次設計熱泵。

湯姆生在 1852 年發表一篇論文陳述一種系統是用一具壓縮機與膨脹器聯接，使空氣由貯氣槽移出及泵入，其作用猶如一熱交換器。這種開口循環單元 (open cycle unit) 可用於建築物之加熱及冷卻，在此論文中湯姆生氏預知密閉循環蒸氣壓縮機器，但不是冷媒便是推動馬達使之能設計任何很像現代的熱泵。

使用此等構想在 1870 年逐漸迅速發展冷凍裝置，許多冷空氣冷凍機已因應國際的冷凍肉類貿易之需要而產生了。1879 年 Glasgow 地方的 Bell-Coleman 氏在船上裝置機械將肉類由英國運至美國及澳洲 [2]。同時，對於未來使用醚，氨，或甲基氯 (methyl chloride) 為冷媒已逐漸發展蒸氣壓縮機。冷空氣冷凍機已開始用二氧化碳機，且在 1970 年代氨壓縮已確立。較小的冷凍裝置在 1930 年代改用甲基氯，又在 1940 年代初期首次使用現代的鹵化碳 (halocarbon) 冷媒 R 12，則更有效了 [3, 4]。

在此冷凍裝置發展期間，熱泵的進展却瞠乎其後。冷凍肉類有了固定的需要，熱泵發展則端視能量成本及有效性，以及其他熱發生器之採用性而定。熱泵自身之發展與冷凍裝置之發展併進。其在熱泵之應用特別有興趣的情形，以後再論。

在 1920 年代所討論的首次熱泵應用是由 Krauss 氏 [5] 及 Morley 氏 [6] 根據湯姆生論文的重述及改善，而且雖已裝置了大量迅速增加的冷凍設備，但性能的分析試驗結果，可行性的熱泵則尚

不存在。

這種分析是 Haldane 氏做的 [7]，他分析在 1891 至 1926 年間所選出的運轉中之冷凍廠數據，得到與熱之輸出溫度有關之 c.o.p. 圖線。(圖 1-2)，示明這是一種逆向噶爾諾引擎(reverse Carnot engine)理論效率的三分之一到二分之一，評估見第 2-2 節的陳述。

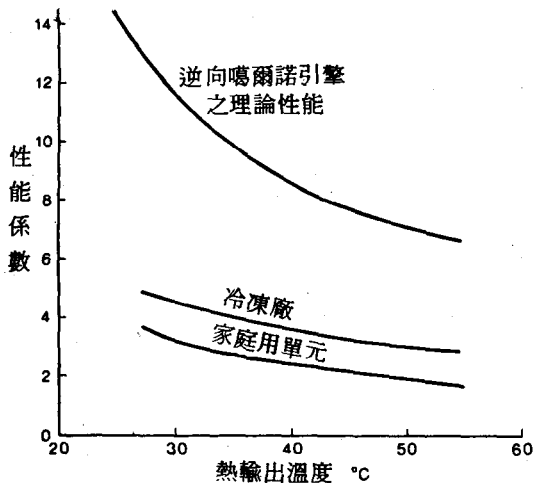


圖 1-2 熱泵性能曲線。由 Haldane 氏對 4.4°C 來源溫度 (-6.7°C 蒸發溫度) 之測定

由此等結果，可見 Haldane 氏所推荐的逆向熱泵以冷却及加熱建築物是值得考慮的，而且說明在室內游泳池中對能量回收熱泵應用之經濟性尤為令人嚮往。雖然設備要改進，且價格有變化，此等建議尚待今日提出。

不含學理的計算，Haldane 氏在 1920 年中期於蘇格蘭 (Scotland) 家中為提供居室取暖及水加熱，建造了一座實驗性熱泵，使用戶外空氣及水為熱源，一具低溫度熱水輻射器將分配系統加熱，且以電力推動冷凍壓縮機。冷媒為氨。供應之電來自一地方性水力發電廠，是一具在現在可採取的技術展示上也看不出有何差錯。家庭單元的性能不如較大冷凍裝置 (圖 1.2) 所希望的那樣良好，但顯示有一個

值得去做的 c.o.p.，且不論稍有噪音的缺點，確已呈現效果了。

或者第一座巨大規模的熱泵是按裝在洛杉磯的南加州愛迪生公司 (Southern California Edison Company) 的辦公廳中，時在 1930～1931 間 [8]，冷凍裝置用於暖房的目的。所得 c.o.p. 在 1.45～1.98 間，雖然在更有利的運轉情況下可達 2.32。

1930 年代的經濟恐慌，在歐洲給熱泵發展提供所需之刺激，而且在 1943 年代已經出現少數大規模的利用。當時“電力服務”雜誌 (Electrical Service) 提出一項有關“能量經濟與熱力學的熱泵”的專門報告 [9]。所開列的可能應用包括利用在凝結過程中蒸氣潛熱 (latent heat of vapour)，工業的回收廢熱，以及空氣及水為熱源來加熱空間的蒸發熱泵 (evaporation heat pumps)。使用渦輪廢熱推動蒸氣渦輪熱泵也已設計了。在當時涉及液體濃縮過程中熱泵抽取是相當經濟的，但在其他應用中，如回收熱是由冷卻裝置產生的，則此廢熱的回收，還只是值得去考慮的事情。

在 1937-41 年間，蘇黎士國會會議廳，議會大會堂以及室內游泳池均已按裝上述的設備。熱泵在學校、醫院、辦公室以及一家製酪場也已採用了，而且由 1920-1943 年間已有 55 種參攷書籍。在美國 1940 年已由 Kemler 及 Oglesby 兩氏開列十五家商業的應用 [11]，大部分均以井水為其熱源。

在美國較小的熱泵單元發展係以家庭用的可逆空氣調節器為基礎，提供的不是加熱便是冷卻。在 1948 年已逐漸充分的對於檢定程序公式化了 [12]；而且在電力供應之公用事業亦實行檢定 [13]。電力需求的可能問題已密切考查，由空氣分配導管流失大量熱的危險亦已注意及之。

在 1950 年左右，美英兩國均已採用地下盤管 (ground coil) 熱源，發展家庭用熱泵。Baker 氏設計一可逆單元與一抗凍儲存槽聯接，且報導在 1950-51 年冬季得一 c.o.p. 超過平均數 3 [14]。Sumner 氏在他家中裝設一具土地熱源 (ground source) 的熱泵取暖 [15]。又 Griffith 氏在“電力研究協會”開始研究由土壤傳遞熱及其性質 [16]。

英國第一座大規模熱泵是 Sumner 氏設計的 [17]，為一實驗性機器，以加熱 Norwich（英國 Norfolk 州一都市）的都市建築區。這種機器在 1945 年運轉，但幾年後拆除了。在其最後形式中是使用一種兩段式壓縮，而以二硫化碳為冷媒，設計之出力約為 240 kW，且以附近一條河水為熱源。計算的 c.o.p. 在 3-4 之間，平均成就在整個加熱季節中已接近較高數字了。

在 1951 年倫敦博覽會為慶祝會堂設計一具實驗性單元。這是一樁頗具野心的實驗 [18] 是常被誤解的論題，值得再深入陳述之。此單元用泰晤士河 (River Thames) 河水為熱源，以都市煤氣運轉之，設計可得 2.3 - 2.6 MW 的熱輸出。高速離心壓縮機乃由改良的 Merlin 飛機引擎轉變之增壓進料器 (supercharger) 推動之，且有一具兩段冷媒循環以級際 (inter-stage) 蒸氣回饋至第二具壓縮機內 (見第 3.3 節) 俾改進效率。冷媒為 R 12，且配合單級 (single-stage) 冷卻操作。但冷媒流通循環的控制及密封有困難。但在加熱系統上供應於 82°C 之水時以一個 0°C 之蒸發溫度，其 c.o.p. 為 2.5 - 3。可惜慶祝會堂的實驗單位使用極為有限，主要原因乃其輸出 (output) 甚大對於該會堂所需之熱已相當過剩，因此這實驗的更大的優越情形有時反而看不出來了。

1954 年左右，在英國還有一種非常不同型式的熱泵發展出來，即 Ferranti-Fridge 加熱器 (Ferranti-Fridge heater) (圖 1.3)。這是一種家庭用的單元，設計由一食物儲藏室中吸取熱量，再用以使水加熱。這單元不大，在夏日有 1.2 kW 的熱輸出，在冬日則為 0.7 kW，但失望的發現一實質的市場並不重視其簡易與成本低。然而，一類似的小型商業機器已發展，且成功的在冰淇淋店中使用，以室中冰箱取來的熱量提供水之加熱。

在 1960 年代初，在美國家庭用可逆的“空氣對空氣”的熱泵已成功的售賣。可惜，並未建立可靠的信譽，因為並不完全認識這種可逆的熱泵比具有冷媒流動換向閥 (reversing valve) 的空氣調節器更需要。到 1964 年可靠性問題已十分嚴重的使美國軍事當局禁止熱泵在軍事住屋中採用，這禁令直至 1975 年 [21] 才終止。愛迪生電氣學