

電力工程學

Basic Electric Power Engineering

原著者：Olle I. Elgerd

譯述者：卓志明 周庭瑞

廖景松

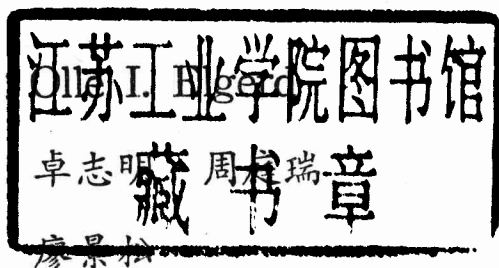
科技圖書股份有限公司

電力工程學

Basic Electric
Power Engineering

原著者

譯述者



科技圖書股份有限公司

原 序

自從 1973 年的石油禁運以及隨後各種主要能源價格的暴漲，使整個世界的經濟、政治以及科技界受到重大打擊。美國被迫着手進行一種極有希望能使能源自給，亦即，國家的自產能源足夠本國自給的總需要。為達到此目的，必需將主要的能量，擺脫缺乏的石油與天然氣，而改用自己可以供應的固態燃料，鈾與煤。新的外來能源因需努力尋求，但實質的估計，由於技術與經濟的時間落後，在本世紀內已無重大之獲益可能。

對能量分野的戲劇性的進展，在美國的教育界中正在作深入的探討。能量研究亦成為多所大學校園中的優先主題，而與能源相關的課程亦包括在內。固態燃料中所含的能，只有在其轉變成電的形式之後才可使用，故電力技術將佔往後國家能量的一個重要地位。恢復重視電力的趨勢，復在大部分有工科的大學中出現。

本書編寫目的，在幫助電力工程教師面對往後新的挑戰。這本書是導引程度，假定學生曾習過一些基本電路概念。曾在佛州大學試教育年屢經修訂而成。全部教材，可供三年級程度六十個小時的授課時間之用。受教的學生則來自工科的各系，並不單屬電機系。

在開始第一章，描出一般性的概念，有關電力對社會的貢獻，尤以對電力如何能適合需要。第二、三兩章，將基本的“能的物性”說明如何能用於電力技術上。

第四至第八章，為本書的主幹部分。我們以新異的觀點，按照程序，從發電機出發，經由變電器，越過功率柵，最後到最重要的消費裝置—馬

達。第九章討論有關電力世界將來的可能發展。這本書的特點，是說明整個電力的統體系統，自發電、變壓、傳遞，到最後的馬達變換操作，完全包羅無遺。

本書以簡潔的筆調，說明全書的內容，雖使用數學模式以資印證，但省去了不必要的複雜性。多采多姿的例題與類比，完成了本書的特色。章節的安排雖照邏輯安排，但各別題材的探討，可任由教師擇定有關章節施教了無困難。

不久將來，美國也要實行公制，故本書選用國際單位。因使用老式單位在換算時頗費周章，故在附錄中列入些換算因數。其中一種“標么”(per unit)制，在電力工程界極為通行，亦經列入。對全世界通行的SI制與此慣用制並無困難。

在編寫本書時，曾受到佛州大學電機系電力組同仁的協助頗多，尤以Erv Priem教授，曾用本書早期的初稿在課堂上試教。

麻省理工學院教授L.A. Gould曾對本書原稿作整體性校閱，並提供有價值的指教。渥海渥大學教授S.A. Sebo與N.A. Smith，亦曾校讀原稿，並代檢誤植與內容修改多起。Addison-Wesley書局的同仁對本書的熱忱出版，在此均表謝意。

佛州的電力投資事業單位如佛州電力公司，佛州電力電燈公司，海灣電力公司，登巴電力公司等，曾對佛州大學的電力工程研究計畫多年來提供財力上的協助，本教材的發展，亦曾受到此項資助。

最後感謝E Huggins小姐對本書原稿及歷次的修改工作多年。內人Margaret的最後原稿的打字，亦表感謝。

O.I Elgerd 愛爾幹。

目 錄

原 序

第一章 能—象徵文明的基石

1.1	歷史觀點.....	2
1.2	工業化社會中能的流動.....	3
1.3	能源消費的成長.....	5
1.4	電能.....	7
1.5	結論.....	11

第二章 能的基本

2.1	能與重力.....	14
2.2	重力場.....	14
2.3	重力能的轉換 - 能的定義.....	18
2.4	位能.....	20
2.5	能量的表示.....	22
2.6	功率.....	23
2.7	能量不滅定律 - 熱力學第一定律.....	27
2.8	位能的其他形式.....	30
2.9	動能形式.....	33
2.10	熱能.....	35
2.11	能量消耗.....	42
2.12	核能.....	44
2.13	太陽能.....	46
2.14	結論.....	47

第三章 電能的基本常識

3.1	電能工程.....	54
-----	-----------	----

3.2	電的自然來源 - 電荷	55
3.3	庫倫定律 - 重力模擬	56
3.4	電場	57
3.5	靜電場能量	58
3.6	電位	60
3.7	一般場的輪廓	62
3.8	靜電能的貯存 - 電容	63
3.9	實用電容器	67
3.10	電動力學 - 電流	72
3.11	導體內的電流	73
3.12	歐姆定律	75
3.13	電能轉換 - 基本電力公式	75
3.14	電阻及歐姆功能消耗	76
3.15	電力傳輸	77
3.16	電源	78
3.17	磁場	83
3.18	磁通	85
3.19	電磁感應 - 法拉第及楞次定律	87
3.20	電磁力定律	93
3.21	互感的觀念	96
3.22	自感的觀念	98
3.23	電磁能的貯存	99
3.24	儲存在互合電路內的磁能	101
3.25	磁矩	102
3.26	鐵磁	104
3.27	結論	118

第四章 同步機

4.1	直流電與交流電	126
4.2	單相交流功率公式	128
4.3	單相交流發電機	137
4.4	三相發電機	149

4.5	平衡三相負載	157
4.6	三相電力公式	162
4.7	三相發電機的轉矩機制	164
4.8	同步機作為電力網的一部分	172
4.9	結論	184

第五章 變壓器

5.1	為何要有變壓器	192
5.2	單相變壓器基本設計	193
5.3	理想變壓器 (IT) 的觀念	195
5.4	理想變壓器與實際變壓器	204
5.5	實際設計上的問題	214
5.6	多層繞組變壓器	217
5.7	自耦變壓器	219
5.8	三相電力變壓器	221
5.9	標么分析	233
5.10	結論	239

第六章 電力系統

6.1	電力系統結構	246
6.2	電力系統運輸問題	249
6.3	實功率平衡 - 負載頻率控制問題	251
6.4	最適發電狀況	257
6.5	線路損失與其控制	259
6.6	負載流分析	276
6.7	結論	288

第七章 直流電動機

7.1	馬達的轉矩 - 轉速要求	296
7.2	直流馬達的原型	298
7.3	實際馬達設計	307
7.4	直流機操作特性	323

7.5	直流電源系統.....	345
7.6	結論.....	351

第八章 交流感應電動機

8.1	為何要有感應電動機.....	358
8.2	基本設計特徵.....	358
8.3	旋轉靜子的磁通.....	358
8.4	轉矩 - 建立的機制.....	365
8.5	三相感應馬達的性能分析.....	376
8.6	非理想馬達特性的模式修正.....	393
8.7	運轉上需要考慮的事項.....	399
8.8	單相感應馬達.....	408
8.9	結論.....	423

第九章 未來的能源發展

9.1	概述.....	428
9.2	能源需求的成長.....	428
9.3	美國能源基礎 - 一個總清查.....	429
9.4	未來電能的重要角色.....	436
9.5	未來的工業趨勢.....	438
9.6	結論.....	444

附錄A. 相量分析

A.1	三角函數向數表示法 - 相量觀念.....	448
A.2	用複數表示向量法.....	452
A.3	阻抗.....	456
A.4	導納.....	461

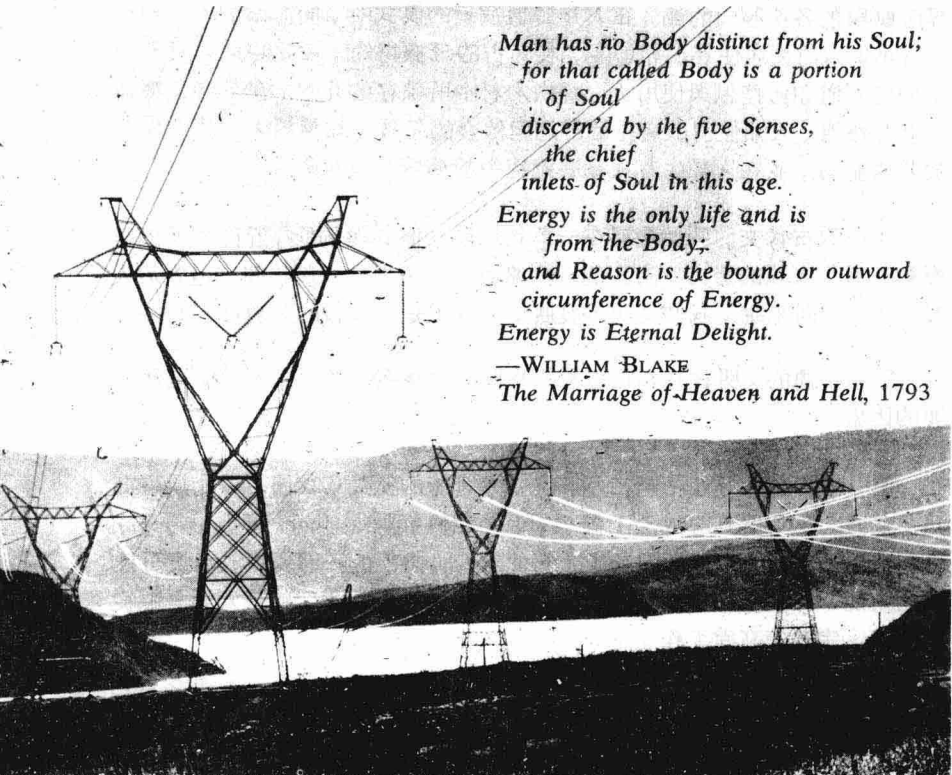
附錄B. 頻譜分析

B.1	週期性.....	464
B.2	諧波波幅的計算.....	465
B.3	用數值積分作頻譜分析.....	467

B.4	空間域的週期性.....	470
附錄C. 國際制單位		
C.1	概論.....	476
C.2	基本單位.....	476
C.3	導出單位.....	476
C.4	乘因子與字首.....	477
C.5	單位制間的換算.....	478
附錄D.	習題答案.....	481

ENERGY THE BASIS OF CIVILIZATION

第一章 能 - 象徵文明的基石



*Man has no Body distinct from his Soul;
for that called Body is a portion
of Soul
discern'd by the five Senses,
the chief
inlets of Soul in this age.*

*Energy is the only life and is
from the Body;
and Reason is the bound or outward
circumference of Energy.*

Energy is Eternal Delight.

—WILLIAM BLAKE

The Marriage of Heaven and Hell, 1793

Overhead high-voltage transmission lines in a
Brazilian "energy corridor." (Courtesy ASEA)

本章將電能 (electric energy) 的發生、輸送、及來自何種能,轉換成何種其他的能,作一介紹性的說明。電能,毫無疑問是一種具有多方面形式,受普遍使用的可用能。供給人們的需要,正以比任何其他形式的能更快速的增長。但電能,僅是我們日常生活所需能量的一種。在我們討論此主要專題前,有必要從歷史的角度與所有能的觀點兩方面去觀察。

1.1 歷史觀點

自從人類出現地球以後,人類便學會運用與日俱增的技巧來善用自然界所賦與的各種形式的能。在人類發展演變的模式中,同血源的人,約在一百萬年以前便居住在溫帶地區。從考古的證據得知,在此時期的祖先們,便已知道如何控制與使用火。經由木材中所儲存的化學形態能源的釋放而獲得熱能,人類便得改善生活舒適與飲食的品質。此種能力,使人類優於其他動物,並在人類生存與發展過程中扮演著無限貢獻。

第一次古代文明開始發展在一萬年以前,很有趣的是,近代文明僅經歷約五百代人類的努力,對人的一生來說,這是很長一段時間,但對於人類存在的時間來說,我們文明的發展,可以說是在最後的一瞬間形成的。

為何我們的文明會在如此短暫的時間內發展呢?讓我們來確認幾個重要的因素。

第一,約在一萬五千至二萬年前,弓與箭的發明,我們可稱此類事物為“武器”、“器具”或“工具”,但“能轉換器”(energy converter)可能是此類事物的最確切稱呼了。它使獵人肌肉能的一部轉換成高度可控的動能(詳見第二章)。它使早期人類覓食工作簡化,並使人類有暇從事藝術、宗教等高尚工作。

獵人放棄游牧生活而定居在古代的城鎮,即代表人類文明的重要里程碑。農業與畜牧,是此種生活方式革命的必要條件。植物與動物在太陽能與食物能中提供維生所需的聯繫。由野生而變成家畜,人類得以控制與改進此種基本能的轉換程序。

陶器的製造與冶金術的發明,提高了人類最早的能源,即木材的需求

。在此同時，森林被焚燒以獲得耕地，在許多地區，由此種作法，造成第一次能源危機的記錄。

基督誕生前三千年，人類即會運用風能。斐尼基人、埃及人、希臘人與羅馬人的艦隊在紀元前便已航行在大海中。由於風力推動的船所增加的機動性，在商業與交通上有着不可磨滅的功勞。馴馬的利用，使人類旅遊更加便捷。紀元初期已有水輪車的發明。

值得注意的是，直到文藝復興時期，人類仍未開始開採今日最重要的化石燃料作能源。當了解煤、油及天然氣所含的潛力時，便有了工業革命。當我們預期人類十代時間內，科學與技術所帶來人類生活的改革時，“革命”兩字可說是最確切的形容。

只有保持工業巨輪的轉動，才能繼續提供人類生活的舒適。人類最嚴重的能源危機將是化石能源儲藏量的日漸減少。在技術與工程領域中，發展新能源以保持工業化國家的高度生活與開發中國家的抱負，將是最重要的工作之一。新能源必需是安全而可靠，並能符合經濟要求。從各種技術的證據，似乎可看出一些重要的新能源，只能轉換成電力形式來利用。此種特殊的能源形式，在可預期的將來，將佔有重要的一席之地。

1.2 工業化社會中能的流動

現在讓我們更詳盡的研究目前能的狀況。圖 1.1 用流程圖形式來描寫能的景象。這流程圖粗略地從原始能源 (primary sources) 追蹤到各種有用的與浪費的熱量。其中百分比的計算是 1976 年的。這些數字說明了下述有趣的事實。

- 碳氫化合物化石，也就是油、天然氣與煤，它包含了我們原始能源的百分之九十四。事實上目前仍需使用這些燃料。

從築有蓄水壩的河流中獲得的水力電能，僅佔不顯眼的百分之四，約半數的美國河流（阿拉斯加除外）都已開發，毫無疑問的那些刺

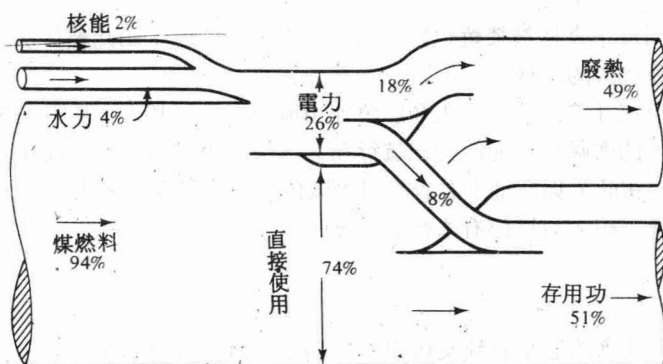


圖 1.1

下的河流必需加以利用來獲取能。正確地說，水力發電已發展得差不多。（在世界其他國家中，水力發電在能源中也有佔相當重要的比例）。

核子能 (Nuclear energy) 雖然目前僅佔百分之二，但在許多能源專家的心目中，將是未來最主要的希望（詳見第九章）。

- 我們能源的有效運用率約為百分之五十。在最重要的能轉換器如內燃機，只具相當低的效率。能的損失常以廢熱形式出現，如車輛發動機的輻射熱損失。有效功 (useful work) 是能轉換程序中可供最後使用的部份。如開車時，抵消磨擦力所需的能，便是有效功。

由以上的關係，我們可指出，能永遠不會損失，而僅轉換成其他新的形式。當新形式以低級能出現時，便是我們所稱的廢能 (waste energy)。熱力學中的不變定律 (immutable laws) 阻礙了再循環此種低級熱能回復到高級形式 (high-grade form) 的能。

- 在圖 1.1 中，不同能的流程，皆以百分比來表示。如以絕對值來看，則相當有趣。用該圖後段的有效能來說，在 1976 年中，能量可累積到約 40×10^{18} 焦耳[†]。這個數目大得沒有意義。因此將此數目除以 1976

[†] 焦耳 (J) 為國際制 (SI) 中基本能量單位，J/s 或瓦特 (W) 為基本的功率 (power) 單位。SI 有時稱為 MKSA，因其基本單位用 meter, kilogram, second 與 ampere。有關能與功率單位將在第二章與附錄 C 中討論。

年美國人口數目 2.15×10^8 ，再除以一年的秒數 31.5×10^6 ，得到 5910 來代表以焦耳/秒或瓦特來量度每人平均能的使用率或功率 (power)。

讀者可能對剛計算的數目含混不清。到底 5910 瓦是大或小呢？如將功率換算成較熟悉的功率單位一馬力 (hp)，便得 7.9 馬力。大部份的讀者可能對此單位較為熟悉。實際上，一個強壯的人，在柔和的活動中很少保持約 0.1 馬力的輸出功率。

上述的 7.9 馬力也可以說在 1976 年中每一美國人的日常生活是由 7.9 個“能奴隸”〔設 1 hp 等於 1 個能奴隸 (energy slaves)〕所供應着。這些奴隸供給汽車與飛機的能，保持我們家中涼爽或溫暖，並幫助我們保持充裕的生活。

在某些國家的人民每人只有一兩個“能奴隸”，僅占全世界人口百分之五的美國，卻使用着三分之一全世界的使用能。

1.3 能源消費的成長

圖 1.1 是描述美國特定年份能源狀況的靜態圖。對於能源使用狀況的動態性 (dynamic aspect) 也極具研究價值。圖 1.2 畫出在 1940 至 1975 期間佛羅里州的電力消耗成長情形[†]。由該圖可看出，消耗的成長，以五年的倍數為基本，依幾何級數或指數 * 增加。約相當於每年百分之十五的成長率。

全美國的電力消耗在同一期間以每十年增加一倍成長。亦即每年百分之七的成長率。在同一時期，美國所有能源的消耗成長率則較慢，約為每年百分之四點五，亦即每十五年增加一倍。我們同時又做了下述的觀察：

[†] 一種幾何或指數型成長，係指用定常百分率增加成複利形式。例如將 100 元存入銀行生息，年息 7%，一年得得本利和 107 元，二年後為 114.49 元，三年後為 122.50 元。在十年後為本金的兩倍，二十年後將為四倍。幾何型成長一倍所需的年數，稱為“加倍年” (doubling time)。在圖 1.2 的半對數紙上表示幾何型程序為一條直線。

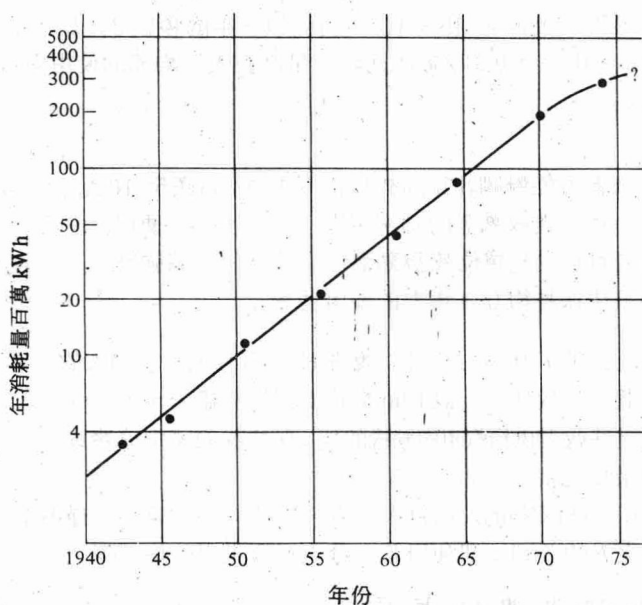


圖 1.2

- 能源需求的成長速度遠超過人口增加的速度，代表着單位消耗能的成長。（很遺憾，世界人口的成長也以幾何級數增加。1976年的四十億人口，是經歷了一百萬年，如按目前的人口成長率，三十幾年後人口將為現時的一倍，不管是好或壞，幾何級數的成長似乎是與生俱來的，一個細胞分裂為二，二再分成四，如此類推下去）。
- 幾何級數的成長程序，被大部份的工程師與科學家所關心，因為這表示某種不能控制的、不穩定的狀況。
- 一個幾何級數的成長程序，當成長的極限達到時，便會有“爆炸[†]”的

[†] 假設佛州湖中的洋水仙 (water hyacinths)，佔了全湖面積的 1%。這種可厭的植物，有如癌細胞，其生產率呈幾何型的。在一年內可以加倍。這種洋水仙第一年內長成 2%，第二年長成 4%。讀者可以推出，在六年以後這湖的一半面積被佔滿了，若再有一年就可將全湖佔滿了。

結果。對整個世界來講，在1970年初期，成幾何級數成長的能源要求，趕上了能源的供應量，直到現在由於世界能源市場的混亂，所造成的動盪不安迄未平息。它所造成的能源危機，對將來能源的供應有很深遠的影響。（在第九章中將對電能技術作更進一步的探討。我們必需對將來能源趨向的預測，下一番功夫。

1.4 電 能

在圖1.1中，雖然電能只佔所有有效能的五分之一（在百分之五十一中佔百分之八）。但在我們日常生活中却扮演着很重要的角色。從偶然停電事件中，便可體會到我們對電能的依賴性。

電力的多功能性 (versatility) 與可用性，係由下述諸特性中發展出來：

- 立可使用性 (availability)
- 容易傳輸性 (transmittability)
- 容易控制性 (controllability)

在太陽系星際探險中，人造衛星藉着電磁波來接收地面命令，並送回實驗資料。利用太陽能作動力的精密電子機械控制系統，可使人造衛星連續操作數年而不需維護。可靠的電子心跳儀，使心臟機能有缺陷者獲得新生活。利用“直接通話”的電話，使我們能和地球另一邊的人們立即通話。

利用電算機使學生們在做本書每章習題時，可免去繁複的數學運算。最新型電算機在幾秒鐘內所做的數學運算，可抵人們一生的力來完成它。電算機又不會有人類的計算錯誤情形發生。

在我們複雜的工業社會中，小如幾分之一瓦，到大如十萬瓦的馬達，帶動着各行各業的巨輪，從以上列舉的例子及其它電力的使用情況中，電能實佔相當重要的地位。

圖1.1表示，大部份的電力，係經由火力或核能或水力的熱能所產生。圖1.3更詳盡的畫出其細節。（技術上的細節問題留待下一章再探討。

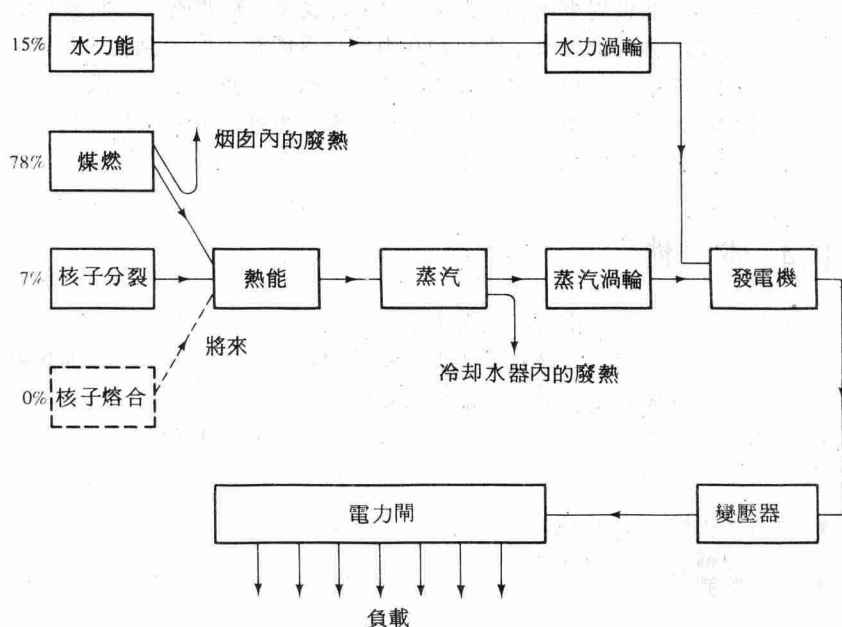


圖 1.3

1.4.1 水力電能

美國約有百分之十五的電力是由水力發電所提供。儲存在水壩內的水，在渦輪機內放出它的位能以帶動發電機，再經由變壓器將電能匯入全國的輸電網路中。水力發電是目前已知最簡單而可靠的發電方式，並具有約百分之九十以上的高效率。由於水壩的投資成本相當高，所以水壩的興建常配合灌溉目的而投資的。在不需任何燃料的費用下，水力發電的經濟效用是很吸引人的。水力發電更沒有環境污染的問題，但水壩的結構，對天然河流系統有巨大而不良的影響。

水力發電的一個相當吸引人處方，在於容易而迅速控制發電量的特性。在水力電廠中，經由渦輪輸入水閥門的開或關，便可很容易改變發電量。電的基本形態，在於不能大量儲存，因此，發電量要剛好夠用即可。由