

美國造船與
輪機工程師
學會審定

美國造船與輪機工程師學會審定

Marine Engineering

輪機工程學

MARINE ENGINEERING

編譯
安裕明
建台
林張周

輪機工程學(上)

林建安
張裕
周台明
編

5922

4413

F1

百成書店印行

美國造船與輪機工程師學會審定

Marine Engineering

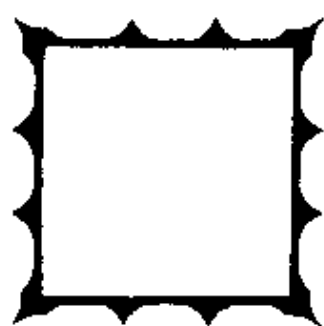
輪機工程學

MARINE ENGINEERING

林建安 編譯
張裕明
周台明

百成書店印行

請
勿
翻
印



版
權
所
有

輪 機 工 程 學

MARINE ENGINEERING

上册 特價 一百五十元

下册 特價 一百一〇元

精裝 合訂本特價三百元

編譯者：林建安 臺灣大學造船研究所碩士
張 裕 成功大學造船系學士
周台明 海洋學院輪機系學士

發行人：沈 秋 和

出版者：百 成 書 店

印刷者：光 興 美 術 印 刷 廠

發行者：百 成 書 店

高雄市五福四路 154 號

郵政儲金戶第九三八三號

電 話：五五三八九七

登記證局版台業字第〇一九五號

中 華 民 國 六 十 七 年 七 月 出 版

序 言

輪機工程這門學科在全國大專院校中已有許多系科列爲必修或選修課程，其講授的內容大致上都離不開基本熱機原理、各型主機的介紹、傳動系統，以及近年來大家所熱衷提倡的自動控制等。惟遺憾的是到目前爲止，坊間還沒有這方面的專書問世，而且對於最重要的實際選用問題和最新發展情形也少有人在國內公開介紹過。緣此，特選美國造船和輪機工程師學會（SNAME）所編的輪機工程（Marine Engineering）一書爲藍本着手編譯。由於美籍船隻在一九二〇到一九七五年間大部分都採用蒸汽渦輪機，所以原書的重點亦多以此爲主；但是爲了配合國輪的需要，故特別在本書第六、七兩章加重柴油機的份量。至於主機和其他輪機輔助器材的選用，除了在第一章已有綜合的討論外，各章內尚分別列有專門的說明。爲了增進閱讀的興趣和效率，在附錄中還列有各章重要的複習問題以資參考。

本書共分爲十章，其中三、四兩章由張裕君執筆；二、五及十叁章由周台明君撰稿；其餘各章則由本人林建安編寫。書中專有名詞爲求通俗易懂，儘可能以目前最常用的稱呼爲準，並在第一次出現時附註原文。在內容方面爲力求完整，編譯者已適當地加以增刪和潤飾，不過疏漏之處恐亦難免，尚祈諸先進賢達惠予指正爲荷；同時，對百成書店沈秋和先生之鼎力支持，謹致以最高之謝忱！

編譯者 謹識

中華民國六十七年五月於高雄

輪機工程學 目 錄

序

第一章 輪機工程概論

第一節	導 論.....	1
第二節	輪機工程與新的設計觀念.....	3
第三節	船運體系的建立.....	10
第四節	主推進系統的要求和發展.....	18
第五節	主機可行性之經濟估算.....	25
第六節	初步設計必須考慮的事項.....	39
第七節	規範書.....	84
第八節	最終設計和施工計劃.....	85
第九節	試驗與試俾.....	92

第二章 熱力理論和熱的利用

第一節	基本理論複習.....	103
第二節	鍋爐內之熱傳遞.....	114
第三節	蒸汽渦輪機之內在熱力理論.....	129
第四節	蒸汽渦輪機之外在熱力理論.....	142
第五節	蒸汽循環的熱力理論.....	157
第六節	柴油機與燃氣渦輪機餘熱的利用.....	186

第三章 鍋爐及燃燒

第一節	船用鍋爐之種類.....	195
第二節	選擇鍋爐的原則.....	216
第三節	鍋爐設計.....	226

第四章 汽旋輪機

第一節	非再熱式汽旋主機	296
第二節	再熱式汽旋主機	310
第三節	核子動力推進汽旋主機	318
第四節	汽旋輪機及燃氣輪機組合推進系統	323
第五節	轉速、級數及尺寸	325
第六節	汽旋機的控制	335
第七節	轉子與葉片	344
第八節	噴嘴、隔板及定葉片	355
第九節	機殼及迫緊	359
第十節	潤滑及軸承	365
第十一節	主推進汽旋機的操作	371
第十二節	輔汽旋機	375

第五章 燃氣渦輪機

第一節	基本上的研討	386
第二節	配置與構造細節	401
第三節	燃氣渦輪機之附件	413
第四節	控制之種類	418
第五節	離心式壓縮機的設計	425
第六節	軸流式壓縮機的設計	432
第七節	渦輪機的設計與構造	439
第八節	燃燒系統	455
第九節	軸承、油封和潤滑	467

第六章 中速與高速柴油機

第一節	柴油機概論	483
第二節	柴油機的特性	491
第三節	柴油機在航運界的使用情形	501

第四節	柴油機設計之基本原則	506
第七章	低速直接耦合柴油機	
第一節	低速柴油機的主要特性	547
第二節	柴油引擎之附屬體系	574
第三節	柴油機之燃油、控制與安裝	598
第四節	低、中速機之最新發展情形	613
第五節	柴油機與螺槳設計	620
第八章	推進動力的傳遞方式	
第一節	減速齒輪概論	628
第二節	輪齒設計應考慮的因素	635
第三節	輪齒的設計	651
第四節	減速齒輪的使用情形	678
第五節	電力推進概論	683
第六節	柴油機所用之直流電驅動系統	691
第七節	渦輪機直流電驅動系統	697
第八節	渦輪機交流電驅動系統	699
第九節	柴油機交流電驅動系統	707
第十節	電力聯軸器	710
第九章	推動軸系、軸承和潤滑	
第一節	推進軸系簡介	715
第二節	軸系的設計	721
第三節	潤滑基本原理	726
第四節	軸承的種類與實務	745
第五節	船上潤滑系統	764
第六節	推進軸系軸承的潤滑方式	777
第十章	自動化	

4 目 錄

第一節 自動化系統	787
第二節 自動化的應用	800

附 錄

各章重要複習問題	826 ~ 831
----------------	-----------

第一章 輪機工程概論

第一節 導 論

人類第一次嘗試着將機械動力應用到船上作為推進和操作動力的歷史，可以追溯到十八世紀；約相當於工業革命剛開始的時候。到了十九世紀初，蒸汽動力推進的船隻終於發展成商業化，於是輪機工程（Marine Engineering）這門科學也跟着建立起來。儘管輪機工程好像起源很早，但是由於這門科學範圍很廣，而且新的機器也一直在演變改進當中，因此即使在這工業鼎盛的二十世紀仍難下一定論，所以迄今這方面的教科書還是不容易編寫。

輪機工程這門學科之所以較難處理的原因之一是，船本身並不是一個單一的產品，相反地，在計劃、設計和建造過程中它需要較多的說明和規劃。因此輪機工程並不像土木工程、電機或化學工程那樣單純，而是融合許多工程原理的一個綜合結果。祇要對水上運輸、作戰、探測和天然資源的利用有關的發展成果，勢必都會影響到輪機工程的演進。

造船和輪機工程所涉及的工程範圍至少有下列幾種：

1-1 內陸水域和遠洋的運輸工作

這包括利用內陸水域和海洋來運輸商品、貨物和人員，其應該使用何種交通工具之概念、設計、建造和操作等工程問題。一般來說，運輸用的船隻在作業上必須配合岸上、陸上的運輸情形；諸如港口的停靠和裝御設備等。至於小型船隻、遊艇和輕巡洋艦等，其目的主要是巡航或運動，因此運輸的功用已是其次。

1-2 艦艇工程

此為研究水面或水中交通工具在軍事上之利用問題。包括海軍水面艦艇和潛水艇之發展構想、設計、建造和操作等工程，以及這些艦

2 第一章 輪機工程概論

艇在作戰體系上之配合運用問題。主要考慮的事項是評定這些軍事艦艇之性能如何，並且設法充分利用之。

1-3 海洋工程

這包括用來作為海洋研究、海洋資源探測和海洋資源開採所需要之交通工具；諸如半潛式船台和固定或浮動之構造物等之使用概念、設計、建造和操作等工程上的問題。

造船工程師和輪機工程師因為彼此任務不同，故所扮演的角色亦有差異。通常，輪機工程師是負責船之推進、操作運轉或從事軍事性的攻擊行動時所需運用器械等之工程問題。詳言之，輪機工程師主要是負責主推進動力系統，船上動力和機械方面的問題；如操舵、錨泊、裝卸貨物、船上艙間之加溫系統、通風、空氣調節、電力的產生和輸送及艙內外通信等，以及其他相關的工作要求。

至於造船工程師通常是考慮船體綫型（Hull Lines）在流體動力方面的特性、船壳結構之設計、船之操縱問題、艙間容積的大小，以及船在水域當中之浮力穩定性能和運動適航能力如何。也許在某些地方必須借助於輪機工程人員的幫忙，但造船工程師對於整條船之內外佈置和造型負有全責。因此除了工程方面的知識外，造船工程師還必須具備有審美的眼光，以期求設計之完美，並且使得艙間內部裝飾具有和建築物一般宜人舒適的特性。

不過水上交通工具的設計，仍然有些地方很難清楚地劃分，到底那些該由輪機工程師或造船工程師來負責。譬如，螺旋槳或推進器的設計就是一個例子；要是將它想成某一種流體機械設備，則屬於造船工程的範圍，但是若將其視為像泵浦、渦輪機等能量轉換設備的一種，則又屬於輪機工程的領域。其他像由螺旋槳或主推進動力系統所激起之船體振動，也是一個類似的問題。本來消滅噪音和抑制振動事實上是船體或機器之動力效應，惟要想達到預期的效果，仍有賴於造船工程師和輪機工程師互相配合進行。此外，貨物裝卸、貨物抽送體系、環境控制、住艙設備及其他許多類似的船舶設計觀念，也都需要造船和輪機工程人員共同攜手合作。

以前關於船型之選擇、設計、建造和操作等諸多事項，造船和輪機工程人員大都分頭獨立進行，目前由於系統分析工程的普遍化，故這種情形已逐告消失，代之而起的是採用廣義的系統工程和系統分析。由於造船和輪機工程包羅萬象，普受新的學理和科技的發展所左右，所以受到近年來科技廣泛成長的衝擊影響很大，加上電子計算機的流行，也使得過去感到費時費力的數學分析大為減化。如今，祇要設計資料齊全，利用這種速捷的計算分析方法，最佳設計已屬可行。此外，由於科技進化的影響，目前有關於運輸作業、海洋探測、海底資源開發的技術正逐漸改良，使得輪機工程的內涵因而更見充實完整。

藉著這一連串的發明、創新和改進，使得輪機工程擁有今天輝煌的成就。不過海洋環境中的工程一直不斷在演變著，所以這本書的寫成祇能說是輪機工程演進過程中一個暫時性的紀錄報告。讀者諸君要想獲悉較新的資料尚須經常參閱最新科技方面的報導，不過在基本原理和現有成就的介紹，我們已盡了最大的努力。

第二節 輪機工程與新的設計觀念

2-1 早期之發展史

大約在一七一二年，在英格蘭西南部的達特木地區，有一位頗富有進取心的鐵匠 Thomas Newcomen，首次成功地發明了原始的蒸汽引擎。當時的用途是用來抽除礦區積水，這個引擎主要包括一個單動式活塞，缸的排列屬於直立式。因為在那個時候金屬製造的技術還很原始，故活塞是用大麻纖維包紮起來的，它跟氣缸的空隙最好的大概祇能作到十六分之一吋；亦即相當於六辨士銀幣的厚度。活塞沒有活塞桿或導桿，直接由一條鍊條連到曲軸柄之一端。利用上行衝程（Upstroke）終了時，噴水進入蒸汽室使得活塞下方形成真空的方法來達成工作壓力差段，當時蒸汽和水之控制閥都還是用手來操作的。大約過了六十年以後，傑姆士瓦特（James Watt）在活塞的徑向構造方面作了改良，使原有之蒸汽機的性能大為改善，因此一般人經常將瓦特視為蒸汽機之發明人。在這之後又有許多改進不斷地出現，其

4 第一章 輪機工程概論

中最有名的大概就是雙動倒式垂直型引擎 (Double - acting Inverted Vertical Engine)，因為它具有很多優點，所以迄今仍在延用。

關於蒸汽引擎的發明和進化情形已有許多篇文章發表過，其中像 Savery、Newcomen、Papin 和 Watt [1, 2, 3]* 等人所著的都是寫得相當精闢的。由上面的簡單敘述看起來蒸汽機好像發跡很早，但是真正用作船之推進動力却一直延到一七八四年才告實現。這種將早期之蒸汽機引進到船上作為推進動力的努力幾乎是同時在美國、蘇格蘭和法國進行的。到一八〇七年之前，也就是勞勃富爾頓 (Robert Fulton) 成功地將蒸汽機應用到一條叫做 Clermont [1] 的木質小明輪時，至少有七艘已經證實達到實用階段的蒸汽船被發展出來。Clermont 船當時航行於哈得遜河，航程從紐約到奧爾班尼，兩地相距一百五十哩，需時約三十二小時。

雖然明輪船 (Paddle Wheel Vessels) 比較適合於內河區，但在 Clermont 船下水後的第十二年，蒸汽船薩瓦那號 (Savannah) 踏上她的遠洋航行的處女航；航程由美國到歐洲。但是不管怎麼樣，當時在出航和返航的航程上，機器的運轉仍無法作到連續不停地作業。

明輪船的發展，大約在五十年後；也就是大東號 (Great Eastern) 汽機船建成之後始達到它的高峯。這條船是由鋼板造的，長度大約有 700 呎長，22,000 噸載重，其大小與今天的乾貨船相比並不遜色，但在那個時候却嫌太大了。

船之推進器啓用螺旋槳 (Screw Propeller) 一直到一八三七年才算有點成績，不過這種革命性的演進似乎並沒有馬上取代帆船的優勢。就是到一八六〇年，用螺槳推進的船隻仍不能趕上當時速度最快的帆船，所以當時海上之交通工具仍然以帆船為主。

到一八九三年，亦即美國造船和輪機工程師學會 (SNAME) 創立的那一年，由三段膨脹蒸汽機所帶動的螺槳船終於在遠洋航運方

* 註：括號內之引數代表本章之參考資料號碼。

面取得了領先的地位；儘管明輪船在當時仍然盛行於內河和旅遊用的汽艇。還有值得一提的，在那個時候蒸汽機船所用的蒸汽機幾乎清一色都是由蘇格蘭式鍋爐（Scotch Boilers）所燒的，煤為普遍採用的燃料。當時蒸汽渦輪機（Steam Turbines）和柴油機（Diesel Engines）尚未問世。

一八九三到一九〇三這十年間可以說是輪機工程發展的旺季。早期往復式蒸汽機（Reciprocating Steam Engine）已經進步到六個汽缸四段膨脹式引擎，利用蘇格蘭式鍋爐，在200磅壓力下，此種蒸汽機之指示馬力（Indicated Horsepower，簡稱為IHP）已高達10,000馬力。利用蒸汽機帶動發電機所產生之100到112伏特電壓的電力亦已逐漸被應用。後來取代蘇格蘭式鍋爐的水管式鍋爐（Water Tube Boilers），此時亦已在美國和英國奠立了基礎。

一八九四年 Charles A. Parsons 第一次成功地將蒸汽渦輪機引用到一條類似於魚雷快艇之小船 Turbinia 號，使得輪機工程的發展又邁向了新的里程。Turbinia 船所用之蒸汽渦輪機具有三排渦輪葉片，旋轉速率大約為2000 rpm，直接接連到相當原始的三俾螺槳。因為初期試俾結果發現推力很小，所以這種原動機的使用和普遍化，仍有待進一步的發展和改進。

緣此 Parsons 乃着手於螺槳的試驗和改進，因為蒸汽渦輪機轉速高，嚴重影響到螺槳葉片的空蝕（Cavitation），所以他首先就從事於空蝕的試驗研究，最後並且成功地重新設計出新的螺槳。一八九七年，英國皇家海軍艦隊在 Spithead 這個地方舉行了一個艦艇操演，Turbinia 以每小時34浬的速度平穩地航行，使得當時的艦隊司令大為驚訝，其所噴出的烟霧就像一隻憤怒的公牛奔馳過沙場所揚起的灰塵一般。後來 Kelvin 伯爵曾將這段盛況這樣記載著『此不愧為自從瓦特時代以來，人們在蒸汽機方面最大的進步』（4）。

早在一八九三年以前，許多內燃機製造廠家即開始在設法發掘新的能源；從火藥到天然瓦斯，凡可以用來當作燃燒動力的能源材料都不放過。這其間有一種完全不同之新型引擎終於被發展出來，這種引擎在燃燒時係先將充氣（Charge Air）壓縮到燃油燃點以上的壓力

和溫度，再噴入油霧而燃燒；此即一八九二年德國工程師 Rudolf Diesel 博士之發明專利品。然而這種初期的柴油機距離實際使用階段仍有許多困難待克服，而且當時改進的情形似乎進行得特別地緩慢，所以一直到 15～16 年以後，第一台 25 馬力的商業用柴油機才總算成功地被製造出來。但是在跨出這技術瓶頸以後，柴油機的進展變得十分神速，因此沒隔多少年，歐洲大陸已相繼發展到每缸 500 馬力的柴油引擎；甚而每個缸 2000 馬力的試驗缸亦開始在試驗中。

〔編者註：目前每缸 4600 馬力之船用低速柴油機，已由義大利 GMT 廠試驗成功，並且已開始產銷使用。中速柴油機，目前英國 Doxford 廠所出品之 Seahorse，其每缸之輸出馬力亦已高達 2500 BHP。〕

在十九世紀和二十世紀交替期間，燃煤低壓往復式蒸汽機受到了蒸汽渦輪機和柴油機從所未有的衝擊。但後來因為第一次世界大戰阻碍繼續發展，所以燃煤蒸汽機得以暫時維持一段時間。戰後，由於燃油的開採和提煉技術進步，人們發現採用油來作為柴油機的燃料或用來產生蒸汽都比用煤有效。同時燃油還有減少船員需要，方便燃料儲存的優點。

以上所述祇不過是簡單地介紹一下輪機工程發展的重要過程，至於其間演變的辛酸血汗史，讀者可以詳查文獻〔1-8〕。

2-2 廣義的設計概念——系統分析

早期促成人們傾力研究輪機工程的道理很簡單，其目的不外是想發展出一個更優良的體系來適應風浪的變化，並加強船舶之推進動力。但時至今日這種要求已變得複雜多了，為了顧及整條船各個部分的需求和改良，系統分析概念的引進已逐漸成為時尚而且也是迫切需要的。

一七七六年，有一位住在 Connecticut 的美國人大衛布施納爾（David Bushnell）建造了第一艘潛水艇龜號（Turtle），並且在英美戰爭中擔任水下攻擊行動，此一創舉在美國帶來了一個革命性的突破。當時的船體係由許多桶板（Barrel Staves）和鐵板作成，利用壓艙桶使船下浸。推進動作則以原始的螺旋狀螺槳（Spiral

Screws) 來進行，有關龜號船之詳細記載可以參閱文獻〔8〕。龜號雖然不是第一艘可潛行的船隻，可是它的創新觀念和嘗試著擔當軍事任務這兩項，却給海上交通工具帶來了劃時代的記錄。

龜號船的操作概念與那個時候的其他發明有點不同，當時它的任務是先讓船沉到水下閃避敵艦的監視，偷偷地將定時爆炸水雷繫到敵艦船底，再行安全離開。龜號船的第一個目標靶是 Admiral Howe's 64-gun 旗艦 HMS Eagle 號，雖然事實上它並沒真的炸了 HMS Eagle，但是這段初期冒險故事已足夠令人鼓舞興奮。於此，喬治華盛頓在寫給湯姆斯傑佛遜的信上就曾這樣寫著『我當時感覺而且現在仍然覺得那是一項絕頂聰明的創舉；爲了突破敵人的防禦陣綫，當然要各方面都能配合，始克有成』〔9〕。

雖然在一個世紀以後又有 Merrimac 和 Monitor 等第一代裝甲艦出現，但在戰艦的進化史上乃以布施納爾的潛水艇最爲突出；此其因無他，祇因爲它提供我們不同的作業概念，並且在戰艦的使用上有了史無前例的創舉。事實上它已具有計劃性技術發展 (Planned Technological Development) 觀念的雛型。目前我們在處理一項問題時，首先都是需要先建立觀念，然後再考慮下列要素：目的所在或初步任務的擬定。接着是就這個決定的目標分析詳細的作業需要，並就達成目的之各種方案以經濟的觀點來評估它的可行性。在這些過程中可能礙於技術、材料、人力、金錢和時間等因素而有許多限制因素存在，此外因爲冒險性大，所以要想順利實施可能還得多承主管當局的關照和支持。

早期基本工程問題的進行，其觀念的形成和目標的決定在現在看起來雖然還是很精巧的，但範圍仍嫌小些，所以往往一個人即可辦到。其實這種研究發展工作的成功與否賭注很大，因爲那時候社會上根本就沒有所謂技術發展的組織，也得不到當時政府機構的支持，其所作的決定往往是單憑個人的感覺，可以說成功都是得力於個人的直覺和機緣。此刻，由於知識專業化、作業電腦化，所以雖然在行事時個人的直覺和時機仍然不可缺，但是到底已抵不上團體作業的集思廣益和凡事系統化的效率。於是一度被視爲主觀神聖的船，現在已客觀地

變成與運輸體系、軍事任務有關的交通工具，或被當作是輸送人員、商品等運輸媒介。

從運輸的功能來說，船可以算是一種最複雜的交通工具。由於經年累月在海上航行，所以在航程中船上各個部門都必須確信能自我維持一段長的時間。船或許可以算是具有最多用途的一種交通工具，它比其他任何一種型式都擁有更多的固定功能。如果將船看成運輸或軍事利用體系的一員，那麼它所包括的東西也比其他交通工具多。船體所包含的機械、電器和結構體系都是相當複雜的，如果再考慮到與周圍環境的配合情形，那問題可就更複雜了。

因為船是由各種因素配合而成的結果，而且在運輸網系中與其他交通工具又息息相關，所以最佳船舶體系的設計實際上並不能亂無章法地作，最好能採用類似於圖 1 所示的系統分析方法〔10～14〕來進行。如此，整個設計過程有一個邏輯順序可循，一旦設計工作完成後也才能確信設計工作中的每個部分是否都已經過妥善的處理。像圖 1 所示的這種系統分析法，係先將整個體系的目標標定出來，然後接着再考慮其他步驟。于此，有一點要強調的是系統分析這種方法是一種連續反覆進行的過程，其用意是盡量讓各個進行步驟彼此都有互相折衝協調的機會。舉個例子來說，在圖 1 裡面，其最初的系統目的假設是某段航程內以固定的運費和辦得到的最低成本來運輸貨物，則在履行這個目標之前，像時間和成本等限制因素都必須先考慮妥當。因為這些限制因素可能改變原來的目的（如排除以原定運費來載運貨物，或提高點運費率可能對整個營運較為有利。），使得原先的目標必須重新改定。在設計進行過程中，像這類事情會一直延續著直到所分析的全部因素都調和了，設計工作才能算是完成。

講得廣泛一點，理論與事實（指將整個體系之限制因素詳細說明出來）配合，即可用來形成一個理論性的研究方案或作成與實際情況類似的模型。換句話說，這種模型建立的目的就是在設法擬定出行動計劃或建議性的技術方法。利用這種分析，並以經驗和過去的使用數據來相驗證，其所得的資料即可反過來修正原先所決定的設計事項、相關的事實、有效的控制及實際目標。系統工程（Systems Engineering），即是用來考慮這種純粹是工程進行過程中所發生的問題

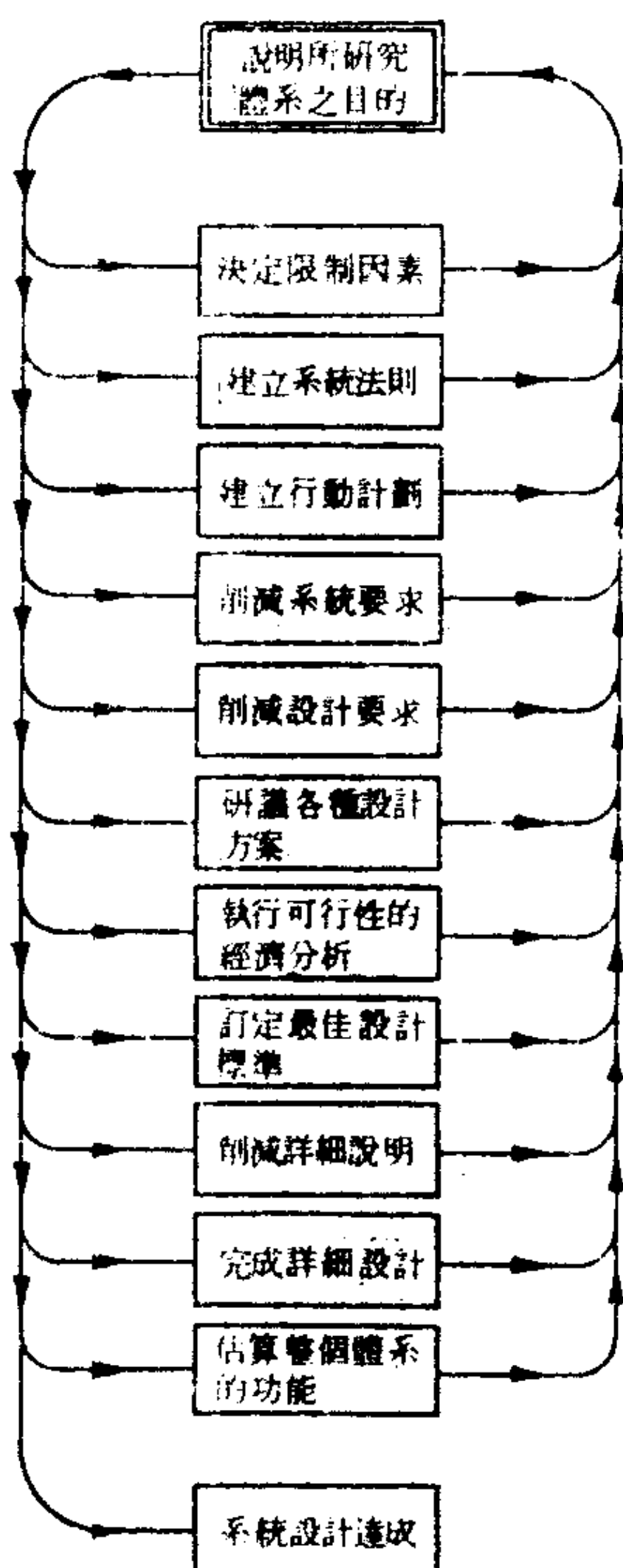


圖 1 系統分析之各個進行步驟

。若加上社會和經濟因素，那就得採用所謂的系統分析（ Systems Analysis ）。作業研究（ Operations Research ），主要是在研究工作的可行性，以及如何充分利用現有的設備、人力和機器。工時學（ Work Study ），是另一種相關的科學原理，它所強調的是如何將人力作最佳的調配和利用，以減少人力需求。當然要想達到這個目的，必須先將過去那種習以為常的工作方式和習慣予以糾正過來。

系統分析理論所根據之目標和限制因素在軍事艦艇體系和商用船運體系的作用當然有所不同，但是兩者之最終目標仍不外是作到經濟有效。譬如，就商船體系而言，其所建議的體系與其他經濟投資相比必須達到經濟有效的要求，以決定在自由貿易的商場中需要冒多少投