

中華科學叢書第七種

火箭推動淺說

著者：夏道師

臺灣中華書局印行

火箭推動淺說

著者 夏道師

臺灣中華書局印行

中華民國五十九年三月二版

中華科學叢書第七種

火箭推動淺說(全一冊)

定價：新臺幣拾貳元正

著者 夏道師

中華科學叢書編輯委員(以姓氏筆劃爲序)

伍法岳	沈君山	沈慶春	李天培
林多標	吳京生	吳家璋	夏道師
浦大邦	許翼雲	趙曾珏	劉鑒
劉全生	鄭伯昆	錢致榕	瞿樹元

發行者 中華書局股份有限公司代表 劉克寰

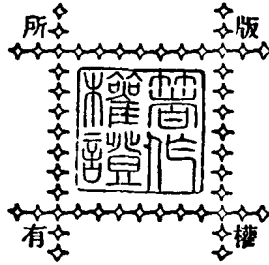
臺北市重慶南路一段九十四號

印刷者 臺灣中華書局印刷廠

臺北市西園路二段一六巷萃街突號

發行處 臺灣中華書局

臺北市重慶南路一段九十四號



中華科學叢書序

近代物理學，可溯源於十九世紀末年之氣體導電，X光，放射性等之研究。六十餘年來，基本物理中劃時代之發展，如一九〇〇年之量子論，一九〇五年之相對論，一九一三年之原子結構理論，一九二四——一九二八年間之量子力學，一九三幾年之原子核物理，一九三九年之原子核分裂。一九四六年介子之發現，及近十餘年來之基本粒子物理及物理學中之對稱定律等。常言「一日千里」，實不足以形容物理學發展之迅速。即從事一部門物理研究工作之學者，對其他部門之新發展亦時感脫節。故各國各部門科學皆有專書及期刊，由各門專家著述，對各部門工作之結果及發展之情形，作綜合性之報告、檢討及分析。此類著作，不僅便利同儕而已。

年來國人對科學及技術於建國之重要，了解漸深，一般青年，對科學、工程技術之興趣亦日趨濃厚。然限於環境，時或有望洋興嘆之感。增強在臺學校中科學教程，固為一基本工作，但以中文著述，介紹科學之新發展，為學校課外之補充讀物實為一極重要、極有意義之事。

我國留美學者：伍法岳、沈君山、沈慶春、李天培、林多祿、吳京生、吳家瑋、吳錦鉉、夏道師、浦大邦、劉鋈、劉全生、錢致榕、瞿樹元諸先生有鑑於此，曾決定從事科學叢書之編譯，各就其專長，選定寫作部門，目前除計劃於近期內陸續出版關於基本粒子，天文漫談，量子電子學，液態氮，高能加速器等五種外，並擬擴大科學部門，廣邀各方面學者專家從事著述。

叢書編輯委員會諸君，皆年青學者，學有專長，茲能熱心從事著述，爲我國科學教育及青年效勞；而中華書局亦以服務精神發行科學叢書。筆者年來對我國科學教育，未嘗忘懷，祇以力不從心，無善可述，茲聞此叢書行將陸續出版，謹向國人介紹，並致個人欽佩喜慰之感。

吳 大 猷

一九六六年十月

自序

火箭推動本是一個牽涉很廣的技術，包括各門基本科學，本書僅就火箭推動的基本原理與應用，粗作介紹。儘可能多從實際方面解述，以適合大眾化胃口。其目的在引起國人對火箭的興趣，藉此提高對基本科學研究的情緒。讀者如要作進一步的鑽研，可從書末所附「火箭推動重要書目及簡評」所列各書中，繼續探討。

本書第一章闡述火箭簡史，其中有關中國在火箭的貢獻，係採自西人記載，手頭缺乏中國歷史書籍，無法考證，其中難免遺漏及訛誤，望國內歷史學者，有以補充及指正。

夏道師序民國五十七年(一九六八年)十一月
應邀返國講授前於美、加州、柏羅阿圖城。

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

火箭推動淺說目錄

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

序 言

第一章	火箭小史.....	1
第二章	火箭推動原理.....	6
第三章	固體推進劑火箭.....	15
第四章	液體推進劑火箭.....	25
第五章	火箭飛行.....	34
第六章	火箭推動展望.....	42
附圖表	一、短程武器火箭之一般.....	52
	二、彈道火箭之一般.....	53
	三、美國發放衛星火箭之一般.....	54
	四、裝運太空人火箭系統之一般.....	55
參考文件		56
索 引		57
附圖表	火箭名稱中英對照表.....	61
有關火箭推動之重要書目及簡介		63

封面說明：

巨人三號 (TITAN III C) 發射圖片(聯合技術公司
United Technology Center 供給)



第一章 火箭小史



中國人發明火藥，這是衆人皆知的事，中國人首先創造火箭，也許知道的人不太多。其實，也可以說火箭是火藥的變，是火藥的用途之一。

中國人發明火藥，確實年代，很難查考。隋煬帝時有火藥雜戲，唐代有火樹銀花，這些是用火藥來作燄火玩意，用火藥製火箭「宋世兵志」曾記載，在宋太宗（公元九七六至九九七年）朝代，有人向皇上呈獻火箭，到宋眞宗做皇帝時，火箭已可放射至百尺以外，用火箭作武器，最早是在宋淳化五年（公元九九四）。宋開禧二年（公元一二〇六年）曾用過「火藥鞭箭」，既稱鞭箭（見 1-1 圖），射程當早已不止一百尺。至宋理宗紹定五年（公元一二三二年）金人圍攻汴京，守軍以鐵罐裝火藥，名震天雷，自城中射出，金人大駭退兵，乃得解圍。這是有史以來火箭首次效命於疆場，立下汗馬功勞，但火箭終就未能挽救南宋的厄運，大宋天下仍是亡在蒙古人手裏，元代開國以來，窮兵黷武，火箭技術，更加改進，可以把火



圖 1-1 宋朝的火藥鞭箭

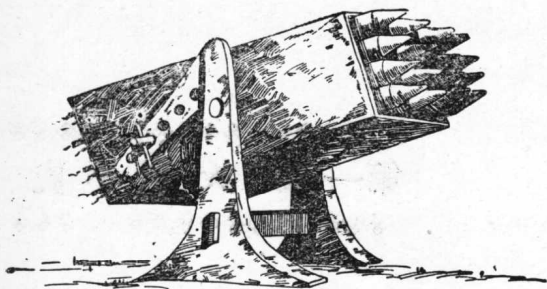


圖 1-2 元朝的火箭發射架

箭裝在發射架上三四十以至於上百的同時發放（見圖 1-2）。元人東征西討，於是火箭技術，傳播至日本阿剌伯以及歐洲。

早期的火箭，因為沒有導引，準確性很差，自從槍礮發明以後，世人對火箭的興趣大減，一直到公元一八〇〇年左右，英國康葛雷爵士（Sir William Congreve）在火箭上，裝配木製尾巴，使火箭得飛平穩（圖1-3），他的四十二磅重火箭，居然能飛二哩，因此火箭技術復為世人重視。世界列強，軍備上都少不了火箭，有的國家，設有火箭兵團，拿破崙波羅（Boulogne）之役以及英國一八〇七年攻取丹麥哥本哈根城，都用過火箭。

一八五〇年左右，衛廉海爾（William Hale）首先在火箭噴嘴（nozzle）內裝安定翼（fin），代替笨重的木尾巴，更增加了火箭的準確性。但是用安定翼穩定飛行的技術，不久

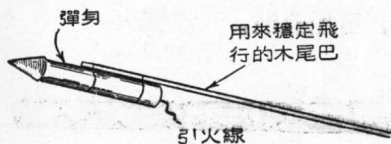


圖 1-3 最初有導引的火箭

就引用到槍礮，槍礮筒內鑄上來復線，其準確性，遠爲火箭所不及，於是十九世紀末期，槍礮又代替火箭，被大家公認爲最有效的武器。火箭的角色，又回到燄火的身份，祇供逢場作戲作消遣而已。

以上所述，都是由火藥而演變的固體推進劑火箭 (solid propellant rocket)。第一位創造液體推進劑火箭 (liquid propellant rocket)，應該是秘魯人鮑萊 (Pedro E. Paulet)，他在一八九五年用三氧化氮 (NO_3) 和汽油做推進劑，用電花 (spark) 引火 (ignition)，他的十公分直徑的火箭，衝力達九十公斤，可是鮑萊筆頭太懶，在二十五年以後才將他的成就寫文章發表，所以第一位液體火箭的創造，反而歸功後人。

一八九六年，俄國數學教授席考斯基 (K. E. Tsiolkovsky) 發表一篇用火箭作太空旅行的論文，他並且建議用氧氣和氫氣做推進劑。在俄國，認爲席考斯基是「火箭始祖」。

第一次大戰以後，美國科學家戈達博士 (Dr. Robert H. Goddard) 用液體氧和汽油，做火箭試驗，一九二六年三月十六日，試飛成功。在美國皆公認戈達是「火箭始祖」，美政府用了很多戈達在火箭上的發明，幾年前曾付給他的遺孀一筆相當數目的專利權使用費。

一九二三年，德國教授奧柏 (Hermann Oberth) 發表了一篇用火箭作星際旅行的宏論，他是第一位用數學算火箭飛行彈道，他並且首先倡用兩級火箭以及用液體推進劑冷卻反應器 (thrust chamber)。奧柏雖然放火箭未能成功，他給德國的火箭技術，奠定基礎。德國在一九二七年成立太空旅行學會，發行火箭雜誌，多次試放火箭成功，都歸功於奧柏，在

德國，以至於歐洲大多數國家，公認奧柏為「火箭始祖」。

其實這幾位「始祖」，最多祇能說是第一位液體火箭的創造者，追本溯源，「火箭始祖」，還應該算是我們中國宋朝那位無名英雄。

德國國社黨取得政權後，研究火箭的機構解體，但德國陸軍，仍繼續地做秘密試驗。在一位年輕的工程師馮白朗*（Werner von Braun）領導之下造成有名的 V-2 火箭，一九四四年二次大戰快結束時，這飛彈給倫敦威脅很大，那時美國的固體火箭 Tiny Tim，不過一呎直徑，十呎長，重量不過半噸多，而 V-2 五呎半直徑，四十六呎長，十四噸重，可以將載荷（payload）送達百哩以外。美國一直到十年以後，造成七十呎長三十噸的紅石（Redstone）火箭，才趕上 V-2。

除了 V-2，第二次大戰時，其他火箭在武器應用方面有顯著的成就，美國有專打坦克車用的 Bazooka 和可以裝在飛機上做轟炸用的飛彈。第二次大戰結束以前，德國製造用火箭做動力的飛機，速度每小時六百哩，盟軍的轟炸機，很受威脅。德國在未潰敗前，曾經試驗成功對付飛機更有效的 Wasserfall 飛彈。據說希魔不相信飛彈，曾一度下令停止在這方面的發展，如若不然，戰局改觀也未可知。

第二次大戰結束以後，美國把德國 V-2 零件，整批運回美國，仔細研究。德國火箭專家，連鼎鼎大名的馮白朗在內，被俘後都送到美國，繼續研究，這批人因在德軍瓦解以前，未得德官方重視，多有積怨，到美國後倒也安心替美國

* 按馮白朗現任美國航空太空署馬歇爾太空中心主任。

工作。他們曾把這批 V-2 零件，裝配成六十五只完整的火箭試放。另一方面蘇聯曾搬回去一個完整的 V-2 工廠，用來做火箭試驗。如今美國和蘇聯的巨型火箭，說起來都是 V-2 的嫡傳。

第二章 火箭推動原理

美國最新巨型火箭農神五號 (Saturn 5)，高三百尺，重三千噸，其規模之浩大，自非古代「火藥鞭箭」所可比擬，但講起推動原理，兩者並無區別。

火箭推動，是依照牛頓力學第三定律：「凡是一個作用力，必有反作用力，兩者大小相等，方向相反」。凡是受過軍訓，放過步槍的，一定體驗過，放槍時，肩下所遭受的回力，子彈向前射的力量是作用力，槍托向後推的力量是反作用力。

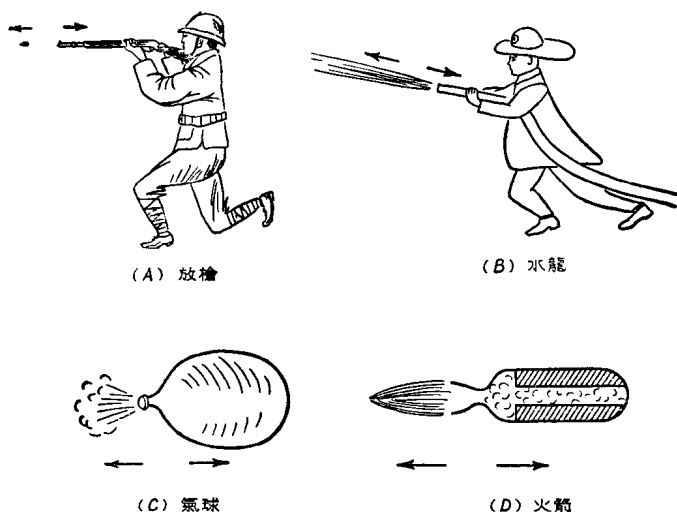


圖 2-1 推動原理——反作用力

凡是看過救火，一定注意到消防隊員抓緊龍頭身體向前微俯，以對付流水的回力，因為水流不斷，這股反作用力也不斷的存在，這和前例放槍的回力，有久暫不同之點。凡是吹過氣球，也許有過以下的經驗。假如吹足氣，沒來得及繫繩子氣球脫手，氣球便滿屋子亂飛，一直等球內氣放完才停飛，氣體向後流，氣球向前飛。火箭飛行，和氣球很類似。推進劑在火箭內燃燒產生高溫氣流，由噴嘴向後流出，於是產生反作用力，將火箭向前移進，火箭和氣球向外流的是氣體，水龍流的是液體，步槍出來的是固體，但無論是氣體也好，液體也好，固體也好，一樣地產生反作用力。

礮的回坐力比槍大，其原因是礮彈比槍彈重，假如放自動式步槍，一秒鐘放兩粒子彈肩下所受的回坐力比一秒鐘放一粒的回坐力大一倍。同樣的道理引用於火箭上，可以這麼說「如要增加火箭的推力，必須增加每秒鐘流出的氣體的份量和增加氣流的速度」，用公式來表達。

$$F_1 = \dot{m} V_e$$

F_1 是推力， $\dot{m}$ 是每秒流出氣體的份量， V_e 是噴射速度 (exhaust velocity)，這公式只能代表火箭推力的一部份，火箭出氣口的氣壓往往不是比空氣的壓力大，就是比空氣的壓力小。壓力的不平衡(見圖 2-2) 產生另一部份火箭的推力 F_2

$$F_2 = (P_e - P_a) A_e$$

A_e 是火箭噴氣口的面積， P_e 是噴氣口的壓力 P_a 是大氣壓力。

火箭的推力(thrust)，是兩者之和：

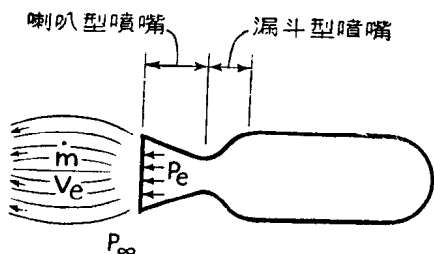


圖 2-2 火箭推力

$$F = \dot{m}V_e + (P_e - P_a)A_e$$

前者稱為動量推力 (momentum thrust)，後者稱為氣壓推力 (pressure thrust)。後者祇佔總推力很少的一部份。

照前面所述增加動量推力 F_1 ，必須增加 $\dot{m}$ ，或是 V_e 。增加 $\dot{m}$ 必須變更火箭的大小和氣流的基本性質 (如壓力溫度等)，牽涉很大。增加 V_e ，比較簡單，其秘訣在火箭出氣口，加上噴嘴 (nozzle)。

很久以前，有人發現如果將氣流在漏斗型 (convergent) 噴嘴流出 (圖 2-2)，增加出氣速度，必須增加噴嘴上流壓力，但速度到達上流的氣體聲速 (speed of sound) 時，不管怎樣增加壓力，出氣的速度，不再向上增高。唯一增加出氣速度的辦法，是在這漏斗型噴嘴的後面，加上一節喇叭型 (divergent) 的出口，這樣出氣的速度可以衝過「聲速」這一道關，變成超聲速 (supersonic)。所以火箭的噴嘴，都採用這種漏斗——喇叭型，以增加噴氣速度，增加推力。

火箭噴氣出口，用上這噴嘴，出口的氣壓減低，這樣一來，豈不是氣壓推力減低了嗎？但是氣壓推力的減少，不及因為增加氣流出口速度 V_e 而增加的動量推力大。可是火箭

的推力，並不是隨着 V_e 的增加而永增無止。氣流在噴嘴增加速度，同時減低氣壓，但等到氣壓降到與大氣壓力相等時，這時火箭的推力達最高峯，如果把這一段喇叭型出口加長，更增高 V_e ，減低氣壓，火箭推力，反而減少。其緣因可以解釋如下：

火箭的推力，固然是可以照前述公式計算出氣口的動量推力和氣壓推力的總和。另一方面，也可以從火箭殼內外所受不平衡壓力中算來。參照圖 2-3，壓力可用垂直於面積的箭頭代表。火箭外殼，所受的是到處均勻的大氣壓力，這可用長短一致的箭頭代表。火箭內身，因燃燒而產生高氣壓，但經過噴嘴逐漸降低，這可用長短不同的箭頭表示。火箭的推力，一部份是由喇叭型噴嘴內外壓力不均得來。如果噴嘴長短如圖 2-3 實線所示，嘴內氣壓與嘴外大氣壓相等。假如把噴嘴截去一節如虛線甲所示。這和那實線的噴嘴情形比較，因為被截去的一節，內壓力比外面大氣壓力大。火箭的推力，

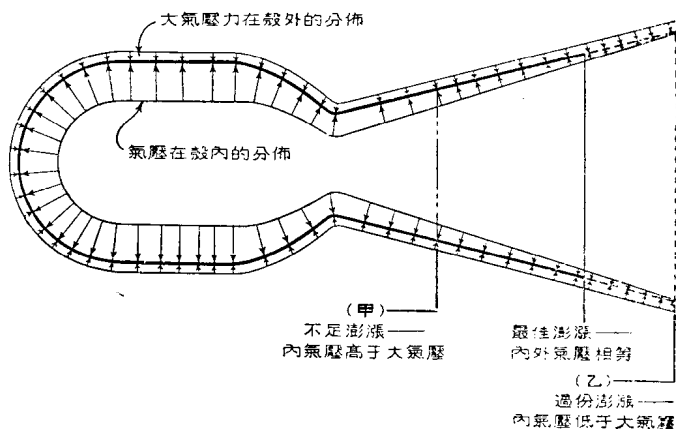


圖 2-3 火箭殼內外壓力的分佈

因爲沒有這一節的幫忙，當然是低些。若是把噴嘴從實線所示加長至虛線乙。這加長的一節內壓力比大氣壓力低，這一節因內外氣壓不均所產生的力量，其方向與火箭前進的方向相反，變成了曳力。所以要使火箭產生最大推力其噴嘴設計應該是照實線所示，在這情況下，噴口內外壓力相等。這樣的噴嘴如增一分則太長，減一分則太短。因爲噴嘴內的氣壓隨着噴嘴橫截面而變更，在喇叭型的一段，橫截面加大，氣壓減少，與噴嘴的長短並無直接關係，所以這實線噴嘴應該說是增一分則太大，減一分則太小。因爲氣流在噴嘴內不斷地在膨脹，氣流在這不大不小的噴嘴口的情況，叫做「最佳膨脹」(optimum expansion)，太小則噴嘴口的氣壓高於大氣壓，叫做「不足膨脹」(under-expansion)，太大則噴嘴口的氣壓低於大氣壓，叫做「過份膨脹」(over-expansion)，大氣的壓力，隨高度 (altitude) 的增加而減低，所以噴嘴的設計，應該斟酌火箭飛行的高度以決定，飛至高空 (upper atmosphere) 或太空 (outer space) 的火箭，所用噴嘴的膨脹比 (expansion ratio)——指噴嘴出口面積與咽喉 (nozzle throat) 面積的比率，比在低空飛行的武器火箭 (tactical rocket) 大得多。飛至高空的火箭噴嘴，其膨脹比是照地面和高空的最佳膨脹的情形，折中而定。

假如火箭噴嘴，祇有漏斗型而沒有喇叭型那一節，如漏斗的噴口面積 A_t ，火箭反應器 (thrust chamber) 內的氣壓是 P_c ，那麼火箭的推力從彈殼所受不平衡的壓力算來，應是 $P_c A_t$ ，如是加上喇叭型一節，照前文所述，火箭的推力加大，用公式來表示：