

73

紊流學

巴克米塔夫原著

朱鵬程譯

中國科學圖書儀器公司

出版

學 力 流 紊

著 原 夫 塔 米 克 巴

譯 程 鵬 朱

中 國 科 學 圖 書 儀 器 公 司

出 版

內 容 介 紹

原書係研究紊流力學的專門性著作，可補大學課程之不足，使讀者能瞭解紊流力學的原理，以便在航空工程及水利工程方面應用。書中包羅各國研究者所得的資料，且理論與實驗並重，是一本值得介紹的書籍。

譯者除把文字忠實地譯出外，並將原書中所用的英制悉改成公制，以便與其他書籍互相配合。書中插圖大部分均經重繪，使更清晰而整齊。

紊 流 力 學

The Mechanics of Turbulent Flow

原 著 者 B. A. B a k h m e t e f f

譯 者 朱 鵬 程

出 版 者 中國科學出版社

印 刷 上海延安中路 537 號 電話 64345

總 經 售 中國圖書公司

版權所有 ★ 不可翻印

CE. 51—0.12 25 開 130 面 84 千字 每千冊用紙 5.15 令

新定價 ¥ 10,000

1953 年 7 月初版 0001—2000

上海市書刊出版業營業許可證出 027 號

譯 者 序

巴克米塔夫所著紊流力學一書，爲近世流體力學之入門。紊流力學之原理，應用日廣，航空工程方面之應用，固不待言，他若水利工程方面，河道中泥沙懸移之問題，近世之研究者，亦多直接與水流之紊動相聯繫。紊流力學，在大學課程之中，講授不多。對於紊流力學之有興趣者，則巴克米塔夫紊流力學一書，自學甚爲相宜。非特書中包羅各國材料，說理簡明，而理論與實驗並重，符合唯物辯證之研究法則。譯者爰於業餘，將此書譯出，並將英制改爲公制，藉供同好。中國科學圖書儀器公司慨允出版，王澤霖，于峻業二同志，重繪書中插圖，予譯者物質與精神上之鼓勵不少。自認學淺，錯誤難免，尙祈讀者不吝指正。

朱鵬程

天津水工試驗所，一九五二年秋

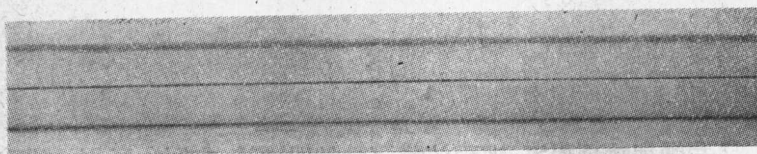
序

工程師與物理學家，處理流體運動的問題時，在同一通用的範圍內，已面臨存在着的兩種不同學識：流體動力學，以若干簡化的假設為物理基礎而由抽象的數學來演算，水力學係一種實用的科學，由試驗確定，與自然的現象密切聯繫，惟缺乏充分而一致的理論。在企求解決特殊的問題時，根據此兩種科學，常易得出互相矛盾的結論，甚至兩者俱不能得出答案，致使學者墮入左右不知所從的境地。

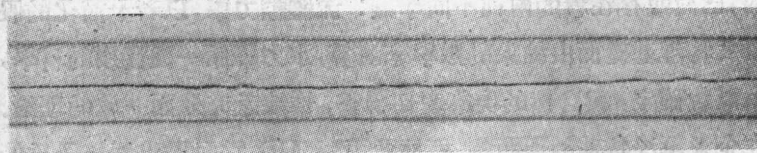
萊姆為從事於純數學工作的代表人物，在他的巨著流體動力學內，承認其實用的限度。應用勢函數及假設“不轉動”運動，得出流體運動途徑的圖案，他指出：“由於觀察結果，在假定的每種情形中，流體運動常大異於圖案中所示的形狀。……如以上述的情形來說，在管口流出的流體，並不立即向各方向分散。事實證明，在離管口一段距離內，形成比較密集的流線，四週為近於靜止的流體所圍繞。常見的事，如由烟囱中流出的挾帶濃烟的氣流。所有諸如此類的情形，發現在貼鄰流線週界的流體運動，漫無規律”。

再者，在討論管中紊流的阻力時，上述的同一作者更指出：“雖然近數年對於這一問題的著述很多，但在上述情形下，直線運動實際的不穩定性，以及不規則漩流抵抗黏性作用而存在的狀況，理論的解釋依然模糊”。

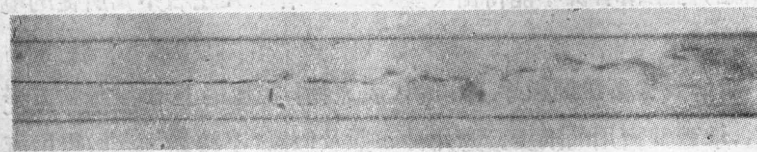
根據勃蘭特的演講，泰脫琴所著的流體與空氣力學一書中，總結現況，很恰當的寫出：



(I)



(II)



(III)

圖 1. 雷諾管中紊流的發源

“舊式的流體動力學，爲求說法的合理，寧願違背事實；而另一方面，水力學以每一個問題當作孤立的情形來處理，並無基本的理論，可以使各個問題互相聯繫。理論的流體動力學似乎與實際失却聯繫；簡化的假設，即使認爲近似法，亦超出許可範圍之外。水力學形同不相關問題的彙集。……水力學愈弄愈像求係數的科學”。

但在最近幾年，已有了新的鑽研方法，更仔細的理論分析，配合着更深入的實驗研究工作，因此已經得到豐富的結果，尤其在卡門及勃蘭特的工作中得到了明證。

因爲最近的進展已很迅速，更因爲所得的結果，祇有一部分用德文和其他國家文字刊佈，也並未十分明白的解釋，所以潑靈斯頓大學曾經努力，用威廉皮孫費爾特的講學金，舉辦演講，使此種新學說，供美國工程師與青年學生的採納。與流體力學、水力學、流體動力學及空氣動力學有關諸點，作了四系列的演講如下：1931年卡門博士講“空氣動力學與流體動力學”；1933年拉南博士講“數學的流動學”；1933年斯班那克教授講“近代流體動力學的方法與成果”；以及1935年巴克米塔夫教授講“應用流體動力學”。

巴克米塔夫教授所作最後一系列的演講，對於流體動力學方面最新的進展有清晰而優美的說明，體系完整，經筆者再三敦促，認爲有刊印的需要。在這種情形下，這本書刊出了；相信它能促進更進一步的研究，自必有其效用與價值。

摩台

潑靈斯頓大學，1936。

引 言

早在建築工匠富有經驗的技藝，開始結晶爲工程的科學與技術的時候，流體的阻力已爲當時研究和討論的中心問題。依薩克牛頓奠定了黏性阻力知識的基礎。一世紀以後，杜培脫和企銳總結在實際工程中遭遇到的，就是在紊流情況下，關於流動的累積經驗，因此奠定了水力學的基礎。自此以後，許多研究者堅忍的鑽研着，大多數用純經驗的方法，去求得係數的數值，可以用來計算實際情形中的水力阻力。他們的工作，不便在此分析與說明。至於人物與成就，舉世所週知。他們不屈不撓努力的有價值的紀念物，寓於此種經驗的寶庫，即工程界設計的無數屹立的建築物中。

流體阻力的研究的新發展爲近世之事，雖然達銳、彭靜，尤其是鮑雪尼斯克都是先進工作者。1880年雷諾的工作，開闢了新的紀元，斯坦登和其他英國學府中的工作者繼之而得到豐碩的結果。可欽佩的勃蘭特另創新的途徑，他的成績是無人能比擬的。事實上，在葛汀根，勃蘭特工作的學府，已經是近代流體力學的搖籃。現在新興的研究中心，舉其主要的，有阿亨、台爾富脫、和巴塞登拿。

流體力學的範圍與立意，包羅舊有原屬於水力學，空氣力學等等範圍的。但是與它們有所不同，用深入透視現象的物理的與動力的要素來代替渾統的和大部份愚拙的經驗的辦法。因此處理實用工程問題的精神與方法，到現在已用數學的物理學的更爲理論的

特性。

用近代流體力學來處理，著有成就的問題之中，有一般性的流體阻力，和特殊的紊動阻力。自從勃蘭特紀元的界層概念創設以來，葛汀根學校，對於此種有趣但是十分繁複的現象，已經作了有系統的深入根源的了解。在廿世紀廿年代的早期，卡門的工作已與勃蘭特的工作並駕齊驅。卡門為葛汀根後起之秀，較他的老師年輕十五年，也是工程師，他先在阿亨，後來巴塞登拿，設立研究所，成績輝煌。其實，在最近十年中，一老一少，兩位先進工作者的進展，時先時後，有時幾乎不能判別，何人為先。

以後年有進展。直到 1930 年左右，一方面，在葛汀根由尼格拉茲所作光管與糙管的試驗結果，已經公諸於世，這種整理觀測資料後而作的試驗是勃蘭特晚近總結和說明的根據。另一方面，卡門所做的理論工作，是具體了解與精通紊流運動內部機要的重大進步之一。就在幾年以前，似乎毫無希望進入的禁域，現在突然開放並且實際可以到達。各種因素的合理關係已經創設並且得到實驗的證明。合理的公式，只有幾個基本常數和互有關係的係數，新的公式是量的表示式，使數值的計算超過需要的精度。

本書的篇幅，力求用有系統的和可能的簡單的形式來表達勃蘭特與卡門研究學府中的最新創作。歷史的順序，未予注意，也略去了許多細節，尤其是高深的數式。祇用了最基本的數學方法，目的在於着重現象的物理性質，基本目的要表達一種為實際工程師易於精通與實用的綱要。此亦足以說明，著者所以設想在第一章中最好編列各種基本的學理與事實，為以後的分析做好基礎的原因。祇有普通大學水力學學理訓練的工程師，就是照現用的編排形式，

雖然已從基本着手，對於此等理論或尙覺生疏。

對於本書的說明與理論的應用範圍，有略予說明的必要。因為所舉的實驗事例與實用公式，完全屬於管流，關於應用範圍的疑問是顯著的。在此，我們可以記住，由於管流有對稱性和有規律，代表最簡單和最實際的情形，可用來澈查和驗證進步的理論和假設。換言之，管流最適用於舉例和說明。

無論如何，構成本書的理論，是完全通用並且應該可以應用到所有情形。這就是本書的名稱，用寬泛的形式的原因，而不侷限於圓柱體導管。從歷史的發展看來，可以有趣的領會到，促進這一方面大部份的研究工作的主要實際問題，是無限液體中，表面所受的摩阻力，是航空中最急要的問題。勃蘭特與卡門二位，用盡心力，在這一方面，來求合理而實用的結果。本書的刊印，著者對於潑靈斯頓大學葛靈院長及摩台教授的熱心幫助，倍致感謝。麥滋克，哥倫比亞大學助理研究員，自願的來擔任繪製與計算圖表工作。潑靈斯頓大學印書股工作同志，對於本書出版工作的關心與謹慎，著者深深誌謝。

讀者若希望得到原始的和更詳細的材料，可以首先翻查兩宗文件，德國工程師協會研究報告第 356 號及 361 號，內有尼格拉茲在葛汀根試驗的報告。勃蘭特的意見，引人入勝的總結，載在 1933 年德國工程師協會期刊的論文中。卡門的理論，1930 年在斯托哥爾摩召開的應用力學會議中發表的論文最為完善。更基本的總結，見航空科學彙報（1934 年第一號）第一冊，第一篇論文。

尙有其他重要的論著與研究工作，在書中隨時註出。但因引用的著述太多，未能有一完整的參考圖書目錄。在精美的實驗物理

手冊，卷 IV，1931~1932 萊潑席刊印，以及以杜雷爲主編的空氣動力學理論的最近一系列文選中，讀者可以得到豐富的參考材料。勃蘭特-泰脫琴的流體與空氣動力學，工程師學會單印本，1934 麥克奇-喜耳書局發行，可以作爲教材之需，包括近代流體力學的全部。英國的成就，可見在流體的機械性質的彙著中，1925 年倫敦，勃拉基父子書局印行，及斯坦登著阻力一書中，1932 年，倫敦郎格門葛禮書局發行。

符號與縮寫說明

(中英對照)

符號	中 名	英 名
h	水頭	head
h_r	阻力水頭	resistance head
ϵ	能力	energy
ϵ_r	能力損失	loss of energy
γ	單位重量	specific weight, weight of a cubic unit of fluid
ρ	密度, 單位質量	density, mass per cubic unit of fluid.
g	地心引力加速度	acceleration of gravity
μ	黏性係數	viscosity Coefficient
ν	運動黏性係數	kinematic viscosity Coefficient
R	雷諾數 = $\frac{\text{流速} \times \text{長度}}{\text{運動黏性}}$	Reynolds Number $= \frac{\text{velocity} \times \text{length}}{\text{kinematic viscosity}}$
l	長度, 長度參變數	length, a length parameter

a	面積,常指橫斷面積	area, usually a cross-sectional area
S	表面,常指外表面	a surface, usually a mantle surface
κ	濕潤週界	wetted perimeter
r_h	企遂水力半徑	Chézy's hydraulic radius
Q	流量,單位時間內,整體流動的容積	a discharge, volume of bulk flow per unit time.
U	流動的平均整體流速	the average bulk velocity of flow
u	流速;常指流動方向流速;常指局部流速,隨地位而改變。	a velocity; usually in the direction of the streaming; usually a local velocity varying with the location.
v	在橫斷面方向的流速	a velocity in the cross-sectional direction
u_m	最大流速,在管之中心	maximum velocity, as at the center of a pipe
y	離牆壁之距離	distance from the wall
r	半徑,常指離中心而改變之距離	radius, usually a varying distance from the center
r_o	管的半徑	the radius of a pipe
d	直徑	the diameter
p	壓力強度	pressure intensity

P	壓力	pressure force
τ	剪應力,常指軸向的切 力強度,並隨地位而 改變	a shearing stress, usually the intensity of a tangential force in the axial direction and varying with the loca- tion.
τ_o	流體與牆壁間的剪應 力	Shearing stress between the wall and the fluid
f	二次公式 $\tau = f \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2}$ 中的阻力係數	friction coefficient in the quadratic formula $\tau = f \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2}$
λ	管中的阻力係數	friction coefficient in a pipe
f	標記一函數	symbolizing a function
—	在因數上加一橫,如 $\bar{\tau}$ 或 $\bar{u}$, 標記一個範圍 內的一個平均值	a dash over a factor, as $\bar{\tau}$ 或 $\bar{u}$, symbolizing an average value within a region.
$\ln$	自然對數	natural logarithm
$\log$	十位對數	decimal logarithm
e	糙率高度參變數	the roughness height parame- ter
e/r_o	相對糙率	relative roughness
u_w	“壁”流速	the “wall” velocity
$\beta = \frac{u_w}{U}$	壁流速與平均流速的 比值	the wall to average velocity ratio
δ	層流層厚度	the laminar film thickness

l	勃蘭特“混和長”	the Prandtl “mixing length”
k	卡門通用混和長常數	the Kármán universal mixing length constant
u_*	勃蘭特“阻力流速”	the Prandtl “friction velocity”
u_d	流速虧值	the velocity deficiency
$u^+ = \frac{u}{u_*}$	流速與阻力流速之比值	the velocity to friction velocity ratio
$y^+ = \frac{u_* \cdot y}{\nu}$	阻距參變數	the friction distance parameter

主要參考文獻

(中外對照)

全國航空顧問委員會刊物

Publications of the National Advisory Committee for
Aeronautics

德國工程師協會期刊

Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure

德國工程師協會研究報告

Forschungshefte des Vereines Deutscher Ingenieure

應用數學與力學期刊

Zeitschrift fur angewandte Mathematik und Mechanik

葛汀根航空研究所結果

Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu
Göttingen

阿亨航空試驗所刊物

Abhandlungen aus dem Aerodynamischen Institut
Aachen

目 錄

譯者序	i
摩台教授序	iii
引言	iX
符號與縮寫說明(中英對照)	Xiii
主要參考文獻(中外對照)	XVii
第一章 基本學理	1
1. 能力損失與剪應力	1
2. 層流與紊流運動	7
3. 雷諾數, 動力相似	13
4. 層流運動的阻力	18
5. 紊流阻力	24
6. 光面與糙面	30
第二章 紊流力學	40
7. 動量互換	40
8. 混和長, 勃蘭特方程式	43
9. 運動流體內在的紊動與黏性因素	48
10. 層流層與勃蘭特“界層”	53
11. 混和長的分佈	57
12. 流速圖型	59