

廢水工程學

——集水工程和抽水工程

編著者 溫 清 光

編 主 館 譯 編
行 印 社 版 出 園 曉
立 國

版權所有・翻印必究

四 版

1989年元月第一次印刷發行

廢水工程學

— 集水工程和抽水工程

定價：新臺幣 220 元 港幣 70 元

編著者：溫 清 光
發行人：黃 旭 政
發行所：曉 園 出 版 社 有 限 公 司

HSIAO-YUAN PUBLICATION COMPANY LIMITED

臺北市青田街7巷5號

電話：(02) 394-9931 (六線)

郵撥：1075734-4 號

臺大店：臺北市新生南路三段96號之三
電話：(02) 3637012 • 3627375

重南店：臺北市重慶南路一段115號
電話：(02) 3313360 • 3149580

工專店：臺北市新生南路一段6之9號
電話：(02) 3968664

逢甲店：臺中市西屯區文華路113號
電話：(04) 2512759 • 2546663

淡江店：臺北縣淡水鎮英專路71號
電話：(02) 6217840

香港所：九龍又一村達之路30號地下後座
電話：3-805807 3-805705

印刷所：復 大 印 廠
臺北市武成街36巷16弄15號

出版登記：局版臺業字第 1244 號

著作執照：臺內著字第 號

原 序

本書第一版“Wastewater Engineering: Collection, Treatment, Disposal”，由於資料增加，再版時即分成兩本。一本名為“Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse”，另一本就是本書“Wastewater Engineering: Collection and Pumping of Wastewater”。

資料的增加是由於 1972 年聯邦政府通過水污染防治修正案（PL 92-500），對廢水工程產生極重大的影響；以及第一版中的(1)入滲量 / 入流量規劃，與(2)集水系統中生物轉換兩小節各擴充成一章。因此在第二版中，修改了很多舊資料，並增加了很多新材料。

廢水工程這本書第二版的目的是(1)介紹由工地發展出來的最新技術；(2)介紹適合於學生、教師及工程師有用的材料；(3)提倡使用公制單位（第一版為英制）。因為世界上大部分的國家都使用公制單位，美國也逐漸採用，所以本書採用公制，並附上英制轉換。公、英制轉換表列在附錄 A。

為了使本書成為教科書或參考書，書中有許多例題，每一例題都列有詳細的解答步驟，以幫助讀者了解原理。有些例題解答完畢後附加評註，以闡明基本觀念和應用。每章後面，共有 120 題左右的習題，以測驗讀者對課文的了解程度。此外書中有 70 個以上的設計數據表；有 155 個左右的圖或照片，以幫助讀者了解基本觀念和實際應用。

筆者希望，本書可教導學生把流體力學的知識，應用到廢水的集水和抽水工程上，因為應用流體力學是都市下水道系統和工業廢水系統設計、施工和操作的基礎。筆者亦希望，國內外顧問工程師、土木工程師和工業技師藉着本書的幫助，能達成此目標。廢水的集水和抽水工程的確是目前世界上極重要的問題。

Aug 9/81

目 錄

第一章 廢水集水工程與抽水工程總論 1

1-1 下水道發展史.....	1
1-2 目前情況.....	3
1-3 現在的趨勢與發展.....	6
1-4 廢水工程和工程師的角色.....	8

第二章 應用水力學 9

2-1 管流及明渠流的基本原理.....	9
2-2 水流方程式.....	18
2-3 水管的尺寸.....	30
2-4 水流公式的圖與表.....	31
2-5 次要損失.....	40
2-6 非均勻明渠流.....	46
習 題.....	58

第三章 廢水量及其測定 65

3-1 廢水的種類.....	65
3-2 廢水的來源及流量.....	65
3-3 廢水流量分析.....	77
3-4 廢水流量的測定——直接測定法.....	83
3-5 廢水流量的測定——流速面積法.....	99
習 題.....	101

第四章 下水道的設計 107

4-1 收集系統和下水道的型式	107
4-2 重力式下水道的設計	110
4-3 重力式雨水下水道的設計	137
4-4 壓力和真空衛生下水道	147
習題	150

第五章 下水道的附屬設備 159

5-1 人孔、用戶接管和沖洗設備	159
5-2 雨水進水口和沉沙井	167
5-3 會合井、漸變段、倒虹吸管、垂直落管和消能槽	172
5-4 溢流和分流結構	181
5-5 流量調節設備	198
5-6 放流口	203
習題	203

第六章 入滲量與入流量 209

6-1 定義	209
6-2 下水道系統的評估和整治	210
6-3 入滲量/入流量分析(第一部份)	211
6-4 下水道系統評估調查(第二部份)	225
6-5 下水道系統的整治(第三部份)	231
6-6 防止和控制 I/I 量的設計標準	234
習題	235

第七章 下水道生物轉換的發生、影響和控制 239

7-1 廢水輸送時的生物轉換	239
----------------	-----

7-2 硫化氫所造成的腐蝕及控制.....	259
7-3 臭味和其他氣體的產生、影響和控制.....	269
7-4 整體設計的需要.....	272
習 題.....	274

第八章 抽水機及抽水系統 277

8-1 抽水分析.....	277
8-2 抽水機.....	284
8-3 抽水機的操作特性.....	298
8-4 抽水機的動力單元.....	311
8-5 抽水機的選擇.....	317
8-6 抽水系統的分析.....	319
習 題.....	350

第九章 抽水站 357

9-1 抽水站的型式.....	357
9-2 傳統式抽水站的設計.....	364
9-3 工廠組合式抽水站的設計.....	389
9-4 壓力幹管的設計.....	393
9-5 壓力幹管的水錘作用.....	400
習 題.....	408

附錄 A 411

附錄 B 423

附錄 C 426

附錄 D 432

索 引 435

第一章

廢水集水工程與抽水工程總論

每一市鎮都會產生液體與固體的廢物，液體廢物稱為廢水，是市鎮使用各種用水後所產生的髒水。從來源的觀點看，廢水的定義應是：住宅、機關、商業及工業所產生之液體，以及地下水、地面水及雨水等滲入下水道的水，統稱為廢水*。

未處理的廢水，含有有機物、致病的微生物、營養物或有毒物質。有機物會分解而產生大量臭氣。通常未處理過的廢水，都含有為數不少的致病微生物，這些微生物是從人體腸內或某些工業廢水排出的。廢水中含有有毒物質，和會促使水生植物生長的營養物。因此在工業社會裏，必須處理廢水。目前，美國聯邦和州政府訂有許多管制廢水的法律[3]，美國人民享有衛生的自來水和廢水的處理，這是維持健康諸要素中的兩個重要因素。

本書是討論廢水收集和抽送的規劃與設計，包括①廢水量的估計（第三章）、②下水道的水力設計（第四章）、③附屬設備的選擇（第五章）、④既有下水道系統的改善和新系統的設計，及入滲水和入流水（inflow）的分析和防止（第六章）、⑤下水道臭味和腐蝕的分析，及避免的方法（第七章）、⑥抽水機的選擇和抽水站的設計（第八、九章）。因為水力學是集水工程和抽水工程的基礎，所以第二章複習水力學基本原理和一些重要的方程式。本章則是介紹廢水集水工程及抽水工程的歷史、目前的趨勢、未來的發展和工程師與廢水工程的關係。

1-1 下水道發展史

根據文獻記載，早期的下水道，以古羅馬地下大排水溝最有名。早期

*根據內政部七十三年所公佈之下水道法，對污水的定義為：家庭污水、商業污水及事業廢水，合稱為污水。其含義與本書的廢水相同。

因為人們並不重視公共衛生，認為強制各家設立衛生設備為侵害個人權利，所以家庭污水管與屋外排水渠道相接的情況不普遍。在古羅馬之後，歐洲和美國早期的下水道，是用來排除雨水。倫敦一直到 1815 年，波士頓到 1833 年，巴黎到 1880 年，才將人類的排泄物，排入下水道 [1]。

雖然在古羅馬時代已有地下大排水溝，但廢水收集設備的設計和施工，後來並無顯著的發展。一直到 1842 年，德國漢堡市發生了一次大火，燒燬了城市的部分，於是才根據新理論，並考慮都市的地形和需要，首次設計出廢水的輸送系統 [1]。這是一次很大的進步。這次設計所採用的原理，在廿世紀以前一直很少被人應用，反而是近代的人用得更多。

1. 倫敦的下水道

1845 年以前，倫敦市尚無充分的都市資料，可做為下水道系統規劃之用。以致於相鄰地區的下水道，常因高程不同而無法銜接。並且有很多很不合理的事情發生，例如下水道比糞坑高，有些下水道的污水須往高處流，有些大下水道要排入小的下水道。繼 1832 年的大霍亂後，1848 年又流行霍亂，其後六年中共有 25,000 多人受害。當時雖然知道飲用水中所含的污染物，與傳染病的迅速傳染有關，但因大部分住家缺少下水道，引起髒亂的環境衛生，而成為消滅霍亂最大的阻力。一直到 1855 年，議會授權給都市工程局，才着手發展完善的廢水收集系統。

2. 美國的下水道

美國早期的廢水收集系統不太清楚，通常係由私人或當地居民出錢建造，政府很少派人監督。美國和其他國家一樣，早期的下水道，常建得比需要的還大。例如在布魯克林區最早的下水道，集水面積不到 20 畝，但下水道的坡度為 $1/36$ ，斷面為 1.5 m 寬，1.25 m 深。有時候不但下水道的出口段很大，甚至整條下水道從頭到尾都一樣大。這種下水道，除非有很大的坡度，否則不可能有足夠的流速冲刷沉積物。有些下水道內的沉積物分解，產生難聞的臭味。有些下水道坡度顛倒，造成污水倒流的現象。

前面已談過，早在 1840 年代就已知道廢水流動的基本原理，但後來才逐漸應用到下水道的設計。有些方程式目前仍在使用，而且是到現在才

完全了解它們的原理和限制。

3. 早期的抽水站

在 1910 年，美國國內的廢水抽水站少於 200 個。雖然當時所用的抽水機型式，與現代的相同，但動力不同。那時因為電力還沒普及，所以都以蒸汽機、瓦斯、汽油或熱氣 (hot-air) 引擎為動力。在 1900 年代初期，電力才普遍用做抽水機之動力。

即使在電力普及以後，有時因為工程師使用慣了舊的動力，也不願意改變。許多市鎮發生問題是因為抽水站不設備用動力；而有的市鎮因不願設置抽水站，反而使下水道埋設較深，總工程費更高。目前，在廢水的集水系統裏，抽水站已是很普遍的設備。

1-2 目前情況

本節只簡要討論集水系統和抽水站，進一步的資料，請參考資料 2 和美國環境保護局 (U.S. EPA) 的出版物。

1. 集水系統 (Collection Systems)

表 1-1 美國使用下水道的人口分佈 [2]

市鎮之人口	1968 年使用下水道的		使用合流式 下水道的百 分率
	人口 (百萬)	百分率 %	
500 以下	0.72	0.5	5
500- 1,000	1.91	1.4	10
1,000- 5,000	13.49	9.6	15
5,000- 10,000	11.14	8.0	20
10,000- 25,000	19.31	13.8	22
25,000- 50,000	15.90	11.3	30
50,000-100,000	16.19	11.5	36
100,000-250,000	13.66	9.7	49
250,000-500,000	16.01	11.4	42
500,000 以上	31.90	22.8	73
合計	140.23	100.0	

4 第一章 廢水集水工程與抽水工程總論

根據 1968 年美國聯邦水質管理局 (Federal Water Quality Administration) [4] 調查，全美約有一億四千萬的人使用公共下水道。市鎮之大小與使用的人口百分率，列於表 1-1。人口在 10,000 人以下的鄉鎮，使用下水道的普及率很小；人口在 100,000 人以上的都市，才有 40 % 以上的普及率。

廢水的集水系統可分為分流式和合流式兩種。分流式下水道是把衛生下水 (sanitary wastewater) 和雨水分開。目前各州政府只准許設立分流式下水道，合流式下水道都屬於老式下水道。

表 1-1 顯示，1968 年時大都市使用合流式下水道的比率較高。人口超過 10 萬人的都市，使用分流式或合流式的人口，超過 45 %。但是，全國使用合流式下水道的市鎮數，少於 15 %；人口數約 25 % [2]。

1972 至 1973 年間，使用下水道的人口數，下水道的總長度及抽水站的數目，列在表 1-2。平均每人使用下水道的長度為 4.53 m (14.86 ft)。管徑大小的分佈，另列在第四章的表 4-3。根據表 4-3 的記載，管徑為 200 mm 以下 (包括 200 mm) 的下水道，約佔 75 %。常用的下水道材料統計，列在表 1-3。

表 1-2 美國的廢水收集系統 (1972-1973) [2]

項目	地形等級 ^a			合計
	1	2	3	
使用下水道的人口， 百萬人	87.1	37.8	28.1	153.0
下水道長度，公里	394,300	171,100	127,500	692,900
抽水站數目	23,800	8,400	4,700	36,900

^a 第 1 級 (平坦)：流速要達最小流速限制之 0.6 m/s。

第 2 級 (中度)：流速可達 0.75 m/s。

第 3 級 (陡)：流速可達 0.90 m/s。

表 1-3 下水道材料的分佈 (1968) [2]

百分率, %/材料種類 ^a	管徑 mm	$D \leq 300$	$300 < D < 600$	$D \geq 600$
陶土管 (VCP)		72	55	1
石棉水泥管 (ACP)		23	10	8
鋼筋混凝土管 (RCP)		—	25	87
鑄鐵管 (CIP)		5	10	4
合 計		100	100	100

^a 現在新下水道 $D \leq 300$ mm, 都以塑膠管 (PVCP) 代替 VCP 和 ACP; 管徑在 300 mm 以上者, 塑膠水管仍佔重要比例。

2. 抽水站 (Pumping Stations)

表 1-2 顯示, 美國在 1972 到 1973 年間, 廢水抽水站共有 36,900 個 (1910 年時少於 200 個), 每個抽水站需要 18.8 公里的下水道。抽水站有工地建造的 (稱為傳統式抽水站) 和工廠組合的。前者屬於大型抽水站, 後者屬於小型抽水站。工廠組合式又可分成氣動、乾井和濕井三種抽

表 1-4 典型抽水站的設計項目 [2]

抽水站的型式 設計項目	工廠組合式 氣動抽水站	工廠組合式	現場建造型 傳統式抽水 站
抽水量, l/s:			
尖峯	3.8	18.9	95
平均	2.2	8.5	45
出水揚程, m	9.1	13.7	18.3
抽水機台數, 包括 備用	2	2	3

水站。目前全美國的抽水站有 20 % 是傳統式，80 % 是工廠組合式（其中 10 % 是氣動抽水站，70 % 是乾井和濕井抽水站）。工廠組合式抽水站多的原因，是抽水站的集水人口少的緣故。抽水站設計項目，列在表 1-4。

1-3 現在的趨勢與發展

廢水工程由於近年來不斷地研究進展，再加上其他科技的應用，因而使得集水系統的設計，有了很大的進步。最重要的進步包括：①衛生與下水道的設計②施工的材料和③下水道系統的管理。

1. 設計

從前認為繪製地圖是最花時間的工作之一，現在可由攝影測量技術解決。有些私人公司和政府機構，已將電腦應用到下水道系統的設計。我們預言，將來可完全用電腦自動設計。但是有些小規模或先天受限制的下水道系統，還是需要用傳統的方法設計。

2. 材料

近年來，由於天然材料與合成材料的進步，使下水道的設計與施工，受到很大的影響。例如：使用塑膠與其他施工材料；增加使用環氧樹脂與其他保護水管的材料；以及下水道使用預鑄人孔和彈性墊材接頭，以減少地下水的入滲。

3. 集水系統的替代方案

集水系統除了傳統式的下水道外，還有其他各種不同的方案，其中以壓力下水道和真空下水道最受注意。有些地方使用這兩種下水道，不但經濟而且可行。有一壓力下水道系統，管徑只有 32 mm，使用破碎抽水機（grinder pump）輸送私人廢水。破碎抽水機粉碎固體物，不會阻塞小管徑之下水道。這種系統最適合小社區之排水。

4. 衛生下水道系統的管理

直到過去幾年，人們對下水道的管理，才逐漸有了正確和廣泛的管理

觀念。其中最重要的是，下水道建設必須做好入滲 / 入流量分析（請參閱第六章），才能獲得聯邦政府的補助。

將來，下水道的設計必須與廢水處理設備的設計，做更多的配合，尤其對廢水在輸送時的變化，更應了解清楚。關於廢水在輸送時的變化，在第七章討論。

5. 雨水下水道的管理

由於雨水對環境的污染漸受注意，現在已應用電腦，來傳輸降雨及承受水體的真時（real time）資料，控制各種溢流設備、抽水站和蓄水設備，以減少雨水放流對環境的影響。將來定會使用更多的電腦，和興建更多之雨水處理設施。

表 1-5 廢水工程的主要單元和工程目標 [3]

單 元	工 程 目 標	章
廢水的來源	估計廢水量、評估減少廢水的技術和廢水性質的決定	2, 3 ^a
來源的控制	廢水排入下水道系統前，在現場提供部分處理的設計（主要是指工業廢水）	3
集水和輸送	設計下水道及其他輸送系統，將廢水從產生源輸送到處理廠或其他設施	2, 4-7
抽水	設計抽水站和壓力幹管	2, 8, 9
處理（包括廢水和污泥）	選擇、分析和設計處理設施，以達到廢水處理的目的。	^a
處分和再用	設計處分設施、處理水的再用和污泥的土地處分與再用。	^a

^a 廢水的性質、處理、處分和再用，另外列在參考資料 3，該資料是本書的姊妹編。

1-4 廢水工程和工程師的角色

廢水工程是環境工程的一支，是利用科學和工程的基本原理於水污染防治的一門科學。廢水管理的最終目標，是同時考慮政治、社會和經濟情況下，保護環境。

廢水工程師應具備有系統規劃、評估、設計、施工、操作和維護等各方面智識與觀念。廢水工程的基本單元和工程目標，列在表 1-5。

本書的焦點（第四到第九章）放在表 1-5 的第三和第四單元。本書和其他的書一樣，具有動態性，隨時重估舊觀念和建立新觀念；在廢水工程的領域裏，扮演積極的角色，這是本書的主要目的。

參考資料

1. Metcalf, L., and H. P. Eddy: *American Sewerage Practice*, vol. 1, 2d ed., McGraw-Hill, New York, 1928.
2. Metcalf & Eddy, Inc.: *Report to National Commission on Water Quality on Assessment of Technologies and Costs for Publicly Owned Treatment Works*, vol. 1, prepared under Public Law 95-500, Boston, 1975.
3. Metcalf & Eddy, Inc.: *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*, 2d ed., McGraw-Hill, New York, 1979.
4. *Municipal Waste Facilities in the United States: Statistical Summary, 1968 Inventory*, U.S. Department of the Interior, Federal Water Quality Administration, Publication CWT-6, Washington, D.C., 1970.

第二章

應用水力學

影響廢水在下水道內流動的主要因素有：

1. 坡降。
2. 斷面形狀及斷面積。
3. 管內表面粗糙度。
4. 水流情況：如滿流或非滿流，穩定流或變量流。
5. 阻礙物、彎管等之有無。
6. 流體之性質、比重及黏度。

本章的目的是複習設計廢水收集、抽水及管理設施所需的水力學。流量的測定在第三章討論，下水道的設計在第四章討論，溢流和分水設備的設計在第五章討論。抽水機水力學在第八章討論，抽水站的設計在第九章討論。本章對水力學只做一簡要複習，詳細之內容應參考流體力學。

2-1 管流及明渠流的基本原理

管流和明渠流的分析，是採用流體力學的三個基本方程式，即連續方程式、能量方程式和動量方程式。在討論這些方程式及其他流體力學觀念前，對常用的名詞應先下定義。

1. 名詞定義

下面是經常用在管線及明渠的名詞，至於其他水力學的名詞，請參看 Vennard 氏 [14] 之流體力學。

- (1) 層流：水在流動的時候，因受黏性作用，流體粒子的流線呈互相平行而不混合的流動稱為層流，一般發生在雷諾數少於 1500 至 2000 之水流。
- (2) 亂流：流體流動時，因臨近兩粒子間動量的改變，產生快速而連續的

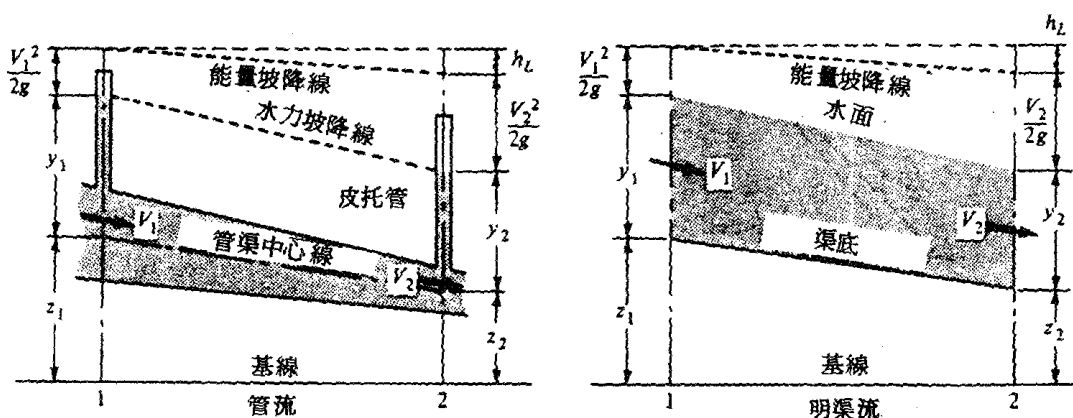


圖 2-1 管流與明渠流之比較

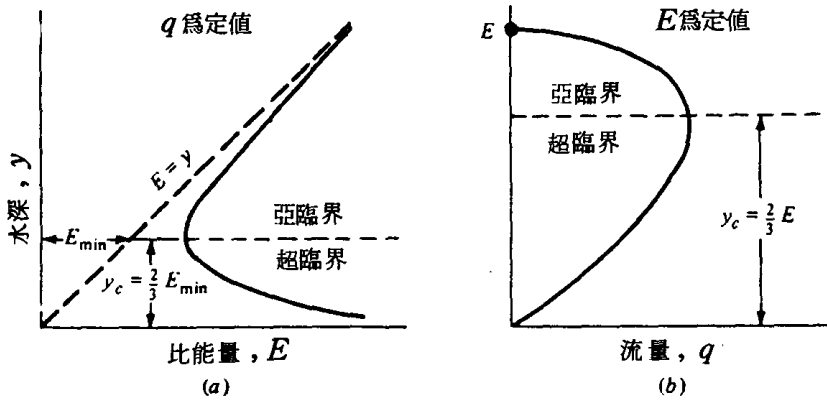
混合，這種流動稱為亂流（或稱紊流），一般發生在雷諾數 6000 至 10,000 以上之流體中。

(3) 管流和明渠流：流體在管渠內的流動，依自由表面之有無，可分為管流（或稱密閉之渠道流）和明渠流。例如管渠內之水流為滿流或壓力流時稱為管流，若非滿流或在明渠內的流動稱為明渠流。兩種流動的比較如圖 2-1 所表示。

(4) 水頭損失：水頭損失是流體在管線或明渠內流動所損失的能量。能量的損失，一部分是由於管渠的摩擦所引起，稱為摩擦損失，另一部分是由於管渠上附屬設備所引起，稱為次要損失。損失水頭以符號 h_L 表示。

(5) 水力坡降線：如圖 2-1 所示，管線上或明渠流內插入皮托管，所上升水之高度的連線稱為水力坡降線。

(6) 能量坡降線：流體在管渠任一斷面上，對某一參考基線的總能量，是管渠對該基線的高度 z 、壓力水頭 y 及速度水頭 $V^2/2g$ 的和。管渠上各點總能量的連線稱為能量坡降線。若沒有摩擦損失，即使高度、水壓或速度改變，能量坡降線恒為水平。然而在實際管渠系統上，由於能量的損失，使能量線呈現坡降狀。

圖 2-2 (a) 比能量圖；(b) q 曲線 [14]

(7) 比能量：比能量 E 有時稱為比水頭，是壓力水頭與速度水頭之和。比能量的觀念在明渠流中特別有用。當流量一定時，比能量與水深間的關係如圖 2-2 (a)，該圖稱為比能量圖。當比能量一定時，水深與單位渠寬之流量的關係曲線，稱為 q 曲線，如圖 2-2 (b)。

(8) 定量流：在任一斷面上之流量不因時間而改變，稱為定量流。

(9) 均勻流與非均勻流：均勻流發生在水深、斷面積和其他水力元素皆保持不變的管渠上，而不均勻流發生在坡度、斷面積和流速隨水流距離而改變的管渠上。文氏管測流量時的水流，為一穩定非均勻流的例子（見第

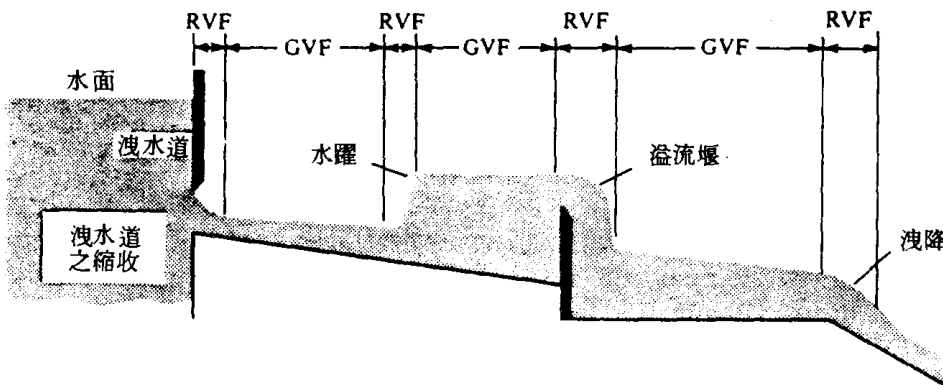


圖 2-3 變速流之縱剖面