

化工輸送現象

— 動量篇 —

游文卿 編著

臺灣區域發展研究院 發行

化工輸送現象

— 動量篇 —

游文卿 編著

江苏工业学院图书馆
藏 书 章

台灣區域發展研究院
王 瑞 拱

臺灣區域發展研究院 發行

化工輸送現象－動量篇 / 游文卿【著】. -- 初版.

-- 臺中市：區域發展研究院， 民 82

面； 公分

參考書目：面

含索引

ISBN 957-8779-00-3 (精裝)

ISBN 957-8779-01-1 (平裝)

1. 化學工程

460

82001984

有著作權 不准翻印

編著者： 游文卿

發 行： 財團法人 臺灣區域發展研究院

行政院新聞局 局版台業字 第5819 號

發行人： 梅可望

總經銷： 財團法人 臺灣區域發展研究院

臺中市工業區一路二巷三號十一樓

電話：(04) 3594499

傳真：(04) 3594599

郵政劃撥戶名： 梅可望

帳號： 20330990

定價： 新台幣 500 元

中華民國 八十二年 四月初版

ISBN 957-8779-01-1

前言

緣起

近年來，化工朝向多元化應用發展，由過去傳統的單元程序、單元操作轉向新高科技的生物工程、高分子材料與工程、電子材料等的發展與應用。化工應用的範圍擴大了，重點改變了；但所探討及應用的原理之本質還是動量、能量、與質量的傳遞。所以，“輸送現象”仍然為化學工程學的基礎原理。

個人由求學到教學，發現大部分的同學或學生們對“輸送現象”總是一知半解地、依樣畫葫蘆似地解習題，甚少瞭解其物理意義及原理，更談不上應用了。其實，“輸送現象”原理不只囿於化工範疇，它存在於我們日常生活的週遭環境與現象中；而 R.B. Bird, W.E. Stewart, 與 E.N. Lightfoot 三位教授所合著的 *Transport Phenomena* 一書也是既基本又淺顯的名著。為了協助國內青年學子能較有效地掌握“輸送現象”學理的意義與觀念，及整理出分析與應用之邏輯與方法，乃決定將個人學習與教學的經驗寫成這本書。

而能量、與質量的傳遞原理相似(analogy)於動量的輸送原理；且在較複雜的問題裡，所需之半經驗或經驗式，也往往利用相似關係由動量輸送導得。本書藉探討動量的輸送，闡明一般的輸送現象原理。

內容

本書討論動量傳送，以層流流動系統為主，並著重微觀觀點之分析。內容共分為基本觀念、一維空間層流流動、多維空間層流流動、紊流觀念、與巨觀分析五部分，簡要述說如下：

(1) "基本觀念"部分，第一章至第三章：

緒論裡介紹基本的名詞與觀念；第二章說明流體之黏度與剪應力之物理意義，並探討其特性與構造方程式；然後闡明薄殼動量均衡的觀念與作法。

(2) "一維空間的層流流動"部分，第四章至第八章：

先分析卡笛氏垂直座標流動系統及說明相關應用；再探討圓柱座標流動系統；然後推導恆溫流體流動系統的變化方程式，及說明其應用；再討論恆溫的非牛頓流體的構造方程式、及其流動。

(3) "多維空間的層流流動"部分，第九章至第十一章：

先分析非黏性流體的位流流動；再探討黏性流體的二維流動及其速度分布；並解說邊界層理論之假設、作法、與應用。

(4) "紊流觀念"部分，第十二章：

介紹紊流的特性，引進波動與時間均化的觀念，定義漩渦黏度與雷諾應力，並推導通性速度分布。

(5) "巨觀分析"部分，第十三章至第十四章：

說明摩擦因數之意義及其應用；再介紹質量、動量、與機械能的巨觀均衡分析與應用；並藉以闡明流量計的測量原理。

其中後面兩部分都只作觀念性的介紹，對那兩部分有興趣者，應進一步參考相關的專門書。

建議與期許

"Scientists tackle those problems which *can be solved*; Engineers are faced with problems which *must be solved*."，科學家學習科學原理，應用科學法則解決科學能解決的問題；工程師不只是應用技術去解決必須解決的問題，工程師更要創新、突破、與超越，既要製造新的材料與

產品提高生活品質、更要開創新穎美好的生活環境。所以，工程師除了須要有相當的科學知識與技術外，還要懂得創造的藝術與應用的契機。相對而言，科學探討現象的真理，著重真實性、精確性與絕對性；而工程師分析並解決問題時，強調嘗試、創新、與實用。學理之應用關鍵在觀念的融會與貫通，必需切實地瞭解物理現象及其意義，才能正確地分析問題及應用原理。所以，工程師講究方法與經驗，並隨時考慮各相關的物理量間之相對重要性。分析的原則、邏輯、與方法在絕大多數的工程問題是相通的。對工程師而言，經驗很重要，但經驗並不只是指個人親身的體驗，而且包括從書本上、從別人、或從類似的事情上去體會並觸類旁通。

工程的書往往選舉具代表性的例題，說明某些原理或其應用；不像科學的書可把相關的現象或原理，有條理地逐一解說。通常例題顯得零散，分析的原則與方法又好像重複敘述。但例題只是提供參考以便觸類旁通，分析的邏輯與方法在許多例題裡很相似，這些一再重複的敘述裡隱藏著所要闡明的分析方法。本書裡對質量與動量之均衡不厭其詳地在每個問題裡詳細解說（尤其是第四章），一方面因為對每一個問題分析的過程必須是這樣的，再方面希望青年學子養成嚴謹的習慣。分析的過程、與邏輯的步驟是不能省略的，惟訓練有素之後自然能極快速地推導得到正確的結論。如果已很熟識分析的步驟，無妨略過細節；如果是初學者，建議要耐心地培養正確的觀念與方法。

感謝

完成這本書，要感謝的人很多，難以一一述及：陳世學教授是我的流體力學與輸送現象之啓蒙老師；王奕凱教授教導我分析的邏輯與方法；呂維明教授的「高等流體力學」課程增長我對流體力學範疇與應用的認識；Professor A.B. Metzner 引導我對流體系統物理意義的思索與探討，他對化工教育的熱忱及對我個人的勉勵與關懷，尤令我感佩。由業師 Professor M.M. Denn 和 Professor J. Wei 的身教，我更深深地體會

到冷靜的頭腦、勤奮的功夫、充分的信心、理智的抉擇、勇於改變、及面對挑戰是成功的要訣。眾恩師教誨，永誌難忘。

也要感謝許多學長、學姊們在我求學與教學的過程裡，給我許多的指導與支持。特別要感謝學長何德仲博士夫婦，在許多方面給予我的協助與鼓勵。本書內容乃根據本人在東海大學化工系所開「輸送現象」課程之筆記編印而成，感謝同學們給我教學相長的機會，特別是喜歡發問的同學們。還要謝謝蕭旭欽與汪慰萱同學，在此書編印過程中的許多幫助。更感激臺灣區域發展研究院發行這本書。最後，感謝我的父母在我的求學、就業、教學與研究的過程中，給我的支持與鼓勵。

游文卿 謹識

中華民國八十二年四月

目 錄

基本觀念 FUNDAMENTALS

第壹章 緒論 Introduction.....	1
1-1 流體(Fluid)與流動(Flow).....	1
1-2 系統(System)與控制體積(Control Volume).....	3
1-3 靜力學(Statics),與流體力學(Fluid Mechanics).....	4
1-4 動量(Momentum)與驅動力(Driving Force).....	4
1-5 穩定狀態(Steady State)與均勻分布(Uniform).....	4
1-6 微觀(Microscopic)與巨觀(Macroscopic).....	5
1-7 量階(Order of Magnitude).....	6
1-8 因次(Dimension)與無因次群(Dimensionless Groups).....	7
1-9 層流(Laminar Flow)與紊流(Turbulent Flow).....	8
第貳章 黏度 Viscosity.....	11
2-1 垂直力(Normal Force)與剪力(Shear Force).....	11
2-2 牛頓黏度定律(Newton's Law of Viscosity).....	14
2-3 剪力率(Shear Rate)與應變率(Rate of Strain).....	16
2-4 非牛頓流體(Non-Newtonian Fluid).....	22
2-5 非牛頓流體的數學模式(Mathematical Models).....	26
2-6 黏度的狀態函數(State Function of Viscosity).....	33
2-7 氣體的黏度原理(Theory of Viscosity of Gas).....	37
2-8 液體的黏度原理(Theory of Viscosity of Liquid).....	41
2-9 雷諾數(Reynolds Number).....	44
第參章 薄殼動量均衡 Momentum Shell Balance.....	47
3-1 薄殼(Shell)之定義及其取法.....	47
3-2 薄殼動量均衡(Momentum Shell Balance).....	50
3-3 動量之驅動力(Driving Force).....	50
3-4 邊界條件(Boundary Conditions).....	54

一維空間層流流動

ONE-DIMENSIONAL LAMINAR FLOWS

第肆章 卡笛氏座標流動系統分析

Analysis of Cartesian Coordinate Flow Systems....57

4-1	平行板間之流體流動.....	57
4-2	施予一平行於板面之作用力.....	58
4-2-1	座標與薄殼控制體積之選取.....	58
4-2-2	流體系統的假設(Hypothesis).....	59
4-2-3	薄殼控制體積之質量均衡.....	61
4-2-4	薄殼控制體積之動量均衡.....	62
4-2-5	構造方程式(Constitutive Equation)與邊界條件(Boundary Conditions).....	65
	(i) 牛頓流體(Newtonian Fluid).....	65
	(ii) 賓漢流體(Bingham Fluid).....	67
	(iii) 冪次律流體(Power Law Fluid).....	68
	(iv) 伊利斯流體(Ellis Fluid).....	70
4-3	施予壓力降於板面之兩端.....	71
4-3-1	座標與薄殼控制體積之選取.....	72
4-3-2	流體系統的假設.....	73
4-3-3	薄殼控制體積之質量均衡.....	74
4-3-4	薄殼控制體積之動量均衡.....	75
4-3-5	構造方程式(Constitutive Equation)與邊界條件(Boundary Conditions).....	78
	(i) 牛頓流體(Newtonian Fluid).....	78
	(ii) 賓漢流體(Bingham Fluid).....	82
	(iii) 冪次律流體(Power Law Fluid).....	85
	(iv) 伊利斯流體(Ellis Fluid).....	88
4-4	平行板間流體因重力作用而流動.....	90
4-4-1	座標與薄殼控制體積之選取.....	91
4-4-2	流體系統的假設.....	92

4-4-3	薄殼控制體積之質量均衡.....	93
4-4-4	薄殼控制體積之動量均衡.....	95
4-4-5	構造方程式(Constitutive Equation)與邊界條件(Boundary Conditions).....	98
	(i) 牛頓流體(Newtonian Fluid).....	98
	(ii) 賓漢流體(Bingham Fluid).....	101
	(iii) 幂次律流體(Power Law Fluid).....	105
	(iv) 伊利斯流體(Ellis Fluid).....	108

第伍章 卡笛氏座標流動系統應用

Applications in Cartesian Coordinate

Flow Systems..... 115

5-1	傾斜平板上之流體因重力而流動.....	115
5-1-1	座標之選取.....	116
5-1-2	假設.....	117
5-1-3	薄殼質量均衡.....	117
5-1-4	薄殼動量均衡.....	117
5-1-5	邊界條件.....	120
	(i) 牛頓流體(Newtonian Fluid).....	122
	(ii) 賓漢流體(Bingham Fluid).....	123
	(iii) 幂次律流體(Power Law Fluid).....	124
	(iv) 伊利斯流體(Ellis Fluid).....	124
5-2	不相混合的兩流體因壓力降而流動.....	125
5-2-1	座標之選取.....	125
5-2-2	假設.....	126
5-2-3	薄殼質量均衡.....	126
5-2-4	薄殼動量均衡.....	127
5-2-5	構造方程式與邊界條件.....	129
5-3	加疊原理(Principle of Superimposition)與應用.....	133
5-3-1	加疊原理.....	133

5-3-2	同時施予拉力與壓力降	134
5-3-3	同時施予重力與壓力降	137
5-4	板面流體厚度變化	142

第陸章 圓柱座標流動系統

Cylindrical Coordinate Flow Systems..... 151

6-1	圓柱座標系統之特性及流動驅動力	151
6-2	環狀區流體因拉力而流動	153
6-2-1	流體系統的假設	153
6-2-2	薄殼控制體積之質量均衡	154
6-2-3	薄殼控制體積之動量均衡	155
6-2-4	邊界條件	156
6-2-5	構造方程式	156
	(i) 牛頓流體(Newtonian Fluid).....	157
	(ii) 賓漢流體(Bingham Fluid).....	158
	(iii) 冪次律流體(Power Law Fluid).....	160
	(iv) 伊利斯流體(Ellis Fluid).....	162
6-3	圓管內之流體因壓力降而流動	163
6-3-1	流體系統的假設	163
6-3-2	薄殼控制體積之質量均衡	164
6-3-3	薄殼控制體積之動量均衡	165
6-3-4	邊界條件	166
6-3-5	構造方程式	167
	(i) 牛頓流體(Newtonian Fluid).....	167
	(ii) 賓漢流體(Bingham Fluid).....	168
	(iii) 冪次律流體(Power Law Fluid).....	170
	(iv) 伊利斯流體(Ellis Fluid).....	170
6-4	傾斜圓管內流體因重力作用而流動	172
6-4-1	假設	173
6-4-2	薄殼控制體積之質量均衡	173

6-4-3	薄殼控制體積之動量均衡.....	174
6-4-4	邊界條件.....	175
6-4-5	構造方程式.....	176
	(i) 牛頓流體(Newtonian Fluid).....	176
	(ii) 賓漢流體(Bingham Fluid).....	178
	(iii) 幂次律流體(Power Law Fluid).....	179
	(iv) 伊利斯流體(Ellis Fluid).....	181

第柒章 恆溫系統的變化方程式

Equations of Change for Isothermal Systems..... 187

7-1	相關名詞.....	187
7-1-1	變化、連續、與運動方程式.....	187
7-1-2	偏微分、全微分、與本質微分.....	188
	(i) 時間偏微分(Partial Time Derivative) $\partial/\partial t$	188
	(ii) 時間全微分(Total Time Derivative) d/dt	188
	(iii) 時間本質微分(Substantial Time Derivative) D/Dt	189
7-1-3	歐拉(Eulerian)法與拉格瑞晉(Lagrangian)法.....	190
7-2	連續方程式(Equation of Continuity).....	190
7-2-1	卡笛氏座標系統.....	190
7-2-2	任意形狀之控制體積(Arbitrary Control Volume).....	192
7-3	運動方程式(Equation of Motion).....	196
7-3-1	卡笛氏座標系統.....	197
7-3-2	運動方程式的一般式.....	200
7-3-3	Navier-Stokes 公式.....	201
7-4	機械能(Mechanical Energy)均衡.....	208
7-5	變化方程式之應用.....	211
7-5-1	例題一：Coutte-Hatschek 黏度計.....	213
7-5-2	例題二：平行盤間之徑向流動.....	217
7-5-3	例題三：旋轉流體之自由表面.....	220
7-5-4	例題四：Cone-and-Plate 板黏度計.....	222

7-6	變化方程式的因次分析	226
7-6-1	連續方程式的因次分析	227
7-6-2	運動方程式的因次分析	228
7-6-3	圓桶攪拌槽的"放大"原理	230

第捌章 恆溫的非牛頓流體流動

Isothermal Flow Systems of

Non-Newtonian Fluid.....239

8-1	非牛頓流體的構造方程式	239
8-2	非牛頓流體流動的應用	242
8-2-1	例題一：環狀區內的切線運動(Tangential Flow).....	242
8-2-2	例題二：平行盤間之徑向流動	249
8-3	非牛頓流體流動的因次分析	253
8-3-1	連續方程式的因次分析	254
8-3-2	運動方程式的因次分析	254

多維層流流動

MULTI-DIMENSIONAL LAMINAR FLOWS

第玖章 位流 Potential Flows..... 261

9-1	流線、粒線、與紋線	261
9-1-1	流線(Stream Lines).....	261
9-1-2	粒線(Particle Line).....	263
9-1-3	紋線(streak lines).....	264
9-2	變形(Deformation)與旋轉(Rotation).....	264
9-2-1	變形(Deformation).....	265
9-2-2	旋度(Curl)與非旋轉(Irrotation).....	270
9-3	位能函數(Potential Function)與流線函數(Stream Function).....	271
9-3-1	位能函數(Potential Function)與位流(Potential Flow).....	271
9-3-2	流線函數(Stream Function)與流動網(Flow Net).....	272

9-3-3	流動網(Flow Net).....	275
9-4	位流與複變位場(Complex Potential).....	275
9-4-1	均勻流動(Uniform Flow), $W = - Uz$	277
9-4-2	轉角流動(Flow Around a Corner), $W = - A z^{\pi/\alpha}$	278
9-4-3	源流與注流(Source and Sink), $W = \pm A \ln(z)$	281
9-4-4	自由旋渦(Free Vortex), $W = i A \ln(z)$	282
9-5	複變位場應用.....	284
9-5-1	例題一：流經圓柱體之位流.....	284
9-5-2	例題一：流入方形槽之位流.....	287

第拾章 二維流動的速度分布

	Velocity Distributions for Two-Dimensional Flow.....	293
10-1	流線函數.....	293
10-1-1	運動方程式.....	293
10-1-2	環繞球體之蠕流流動.....	296
10-1-3	終端速度(Terminal Velocity).....	304
10-2	拉動平板之非穩定流動.....	304
10-2-1	牛頓流體.....	305
10-2-2	冪次律流體.....	309
10-3	圓管內之非穩定流動.....	312

第拾壹章 邊界層理論 Boundary Layer Theory.....323

11-1	邊界層理論之觀念.....	323
11-2	拉動平板之非穩定流動.....	324
11-3	流過平板之非均勻流動.....	329
11-4	置移厚度(Displacement Thickness)與動量厚度(Momentum Thickness).....	335

第拾貳章 紊流的速度分布

Velocity Distributions in Turbulent Flow.....343

12-1	波動(Fluctuation)與時間均化(Time-smoothed).....	343
12-1-1	紊流與層流.....	343
12-1-2	波動與時間均化.....	345
12-1-3	紊亂度(Turbulence).....	347
12-2	變化方程式.....	349
12-2-1	連續方程式.....	349
12-2-2	運動方程式.....	350
12-3	雷諾應力(Reynolds Stress).....	351
12-4	通性速度分布(Universal Velocity Distribution).....	353
12-4-1	緊靠著管壁之層流薄層區.....	354
12-4-2	離管壁較遠之紊流核心區.....	355
12-4-3	漩渦黏度與黏度之比值.....	356
12-4-4	通性速度分布.....	358

巨觀分析 MACROSCOPIC ANALYSIS

第拾參章 界面的摩擦因數

Friction Factors at Interface.....363

13-1	摩擦因數(Friction Factor).....	363
13-2	圓管內軸向流動的摩擦因數.....	365
13-2-1	圓管裡軸向的層流流動.....	365
13-2-2	圓管裡軸向的紊流流動.....	366
13-2-3	圓管裡軸向流動之因次分析.....	367
13-2-4	粗糙度與截面形狀.....	369
13-2-5	流量之求法.....	370
13-3	流過一球體之摩擦因數.....	372
13-3-1	流經球體之蠕流流動.....	372
13-3-2	流經球體之流動的因次分析.....	372

13-4 填充床之分析	376
-------------------	-----

第拾肆章 巨觀的均衡與應用

Macroscopic Balances and Applications.....	383
14-1 巨觀的均衡(Macroscopic Balances).....	383
14-1-1 質量均衡(Mass Balances).....	383
14-1-2 動量均衡(Momentum Balances).....	385
14-1-3 機械能均衡(Mechanical Energy Balances).....	386
14-2 管線之摩擦損失(Friction Loss)	389
14-2-1 直管(Straight Pipe).....	390
14-2-2 管徑驟然放大(Sudden Expansion).....	391
14-2-3 管徑驟然縮小(Sudden Contraction)及其他.....	393
14-3 流量計(Flow Meters)之原理	396
14-3-1 針孔流量計(Orifice).....	396
14-3-2 噴嘴流量計(Nozzle).....	399
14-3-3 文氏流量計(Venturi).....	400
14-3-4 浮子流量計(Rotameter).....	401
14-4 穩定的流動系統應用	404
14-5 非穩定的流動系統應用	406
14-5-1 以排流管排放圓桶內之流體	406
14-5-2 排放漏斗內之流體	408

符 號	413
-----------	-----

附 錄	423
-----------	-----

附錄 A 空氣和水之密度、黏度、與動黏度	423
附錄 B 卡笛氏座標之微分運算	424
附錄 C 曲線座標(Curvilinear Coordinate)之微分運算	426
附錄 D 變形張量(Deformation Tensor).....	431
附錄 E 加疊原理	432
附錄 F 複變之運算及解析函數	434

參考資料	437
索引	445