

高等学校教学参考书

化工原理的教学与实践

丁惠华 主编

化学工业出版社



高等学校教学参考书

化工原理的教学与实践

丁惠华 主编

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字039号

图书在版编目(CIP)数据

化工原理的教学与实践/丁惠华主编. —北京: 化学工业出版社, 1992.11 (1999重印)

高等学校教学参考书

ISBN 7-5025-1034-6

I. 化… II. 丁… III. 化工原理-高等学校-教学参考资料 IV. TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字 (95) 第15789号

高等学校教学参考书

化工原理的教学与实践

丁惠华 主编

责任编辑: 徐世峰

封面设计: 季玉芳

•

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

北京市燕山印刷厂装订

•

开本787×1092毫米1/16 印张 9 字数220千字

1992年11月第1版 1999年7月北京第3次印刷

印 数: 5001—6500

ISBN 7-5025-1034-6/G · 282

定 价: 14.00元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

序

本书为化工原理课程教学指导委员会确定编写的化工原理教学参考丛书之一。在一九八八年十一月合肥会议上，审查了编写大纲和已写出的两章书稿（初稿）。本书就是按合肥会议审核通过的大纲编写的。

本书根据编者多年的教学经验，针对化工原理课程中若干疑难问题，进行加深和拓宽，并力求和工程实际问题密切结合。此外，有些在化工原理教材上不讨论而在实际中又经常遇到的问题，例如不稳定热传导，多组分单级和多级分离过程的计算以及化学吸收等课题，作稍多一些的讨论，可使教师及优良学生拓宽知识面，同时也可供有关工厂、设计、研究等单位的工程技术人员参考。全书共分十二章：第一至六章探讨流体流动、不稳定热传导和对流传热方面问题，第七至十一章讨论多组分单级和多级分离过程计算及化学吸收等方面问题，第十二章讲述应用化工原理理论知识解决工程实际问题的几个例子，使学生加深对学习本课程的意义认识。

本书第七和十章由王纯编写，第十一章由魏德孚编写，其余各章均由丁惠华执笔。全书由陈洪钊教授（天津大学）主审，最后由丁惠华修改定稿。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬希读者批评指正。

编 者

内 容 提 要

本书针对化工原理课程中若干疑难问题以及有些教科书上不讨论而在工程实践中又经常遇到的课题,进行加深、拓宽和探讨。全书共分十二章:第一至六章探讨流体流动、不稳定热传导和对流传热方面问题,第七至十一章讨论多组分单级和多级分离过程计算及化学吸收等方面问题,第十二章讲述如何引导学生应用化工原理理论知识解决工程实际问题的几个例子。本书可作高等院校或同类学校化工原理课程的教学参考书,也可供石油、化工、轻工等部门从事研究、设计与生产的工程技术人员参考。

目 录

第一章 从相似的概念讲述直管中的摩擦阻力因素	1
1-1 直管中流体作层流和湍流流动时力的平衡	1
1-2 相似的基本原理	4
1-3 用相似的概念导出流体在管内作湍流时的摩擦阻力因素	8
1-4 流体阻力实验数据处理举例	10
1-5 几点体会	11
第二章 叶片装置角β_2对离心泵压头的影响	12
2-1 离心泵的基本方程式	12
2-2 装置角 β_2 与总压头 H_{∞} 、静压头 H_s 和动压头 H_d 间的关系	13
2-3 泵的理论压头与实际压头	16
第三章 离心泵的相似及比转数的意义	18
3-1 两个叶轮在运转时相似的必要条件	18
3-2 泵的近似相似与比转数	21
3-3 输送粘性液体($\nu > 20\text{cSt}$)时,离心泵特性曲线的换算.....	24
第四章 离心通风机的无因次特性曲线	29
4-1 风机的流量与流量系数	29
4-2 风机的压头与全压系数	30
4-3 风机功率与功率系数	31
第五章 对流传热的相似关系	34
5-1 流体流动微分方程式及其相似转换	34
5-2 对流传热微分方程式及其相似转换	37
5-3 壁与流体在交界上的换热微分方程式	39
第六章 不稳定热传导	41
6-1 一维不稳定热传导方程	41
6-2 半无限平壁的解析解	42
6-3 无限平壁两侧壁面突然变化为 t_w 时的不稳定热传导	44
6-4 无限平壁当外界热阻不能忽略时的不稳定热传导	45
6-5 二维和三维不稳定热传导	54
6-6 不稳定热传导问题的数值算法	56
第七章 多组分单级平衡过程	61
7-1 泡、露点计算.....	61
7-2 液化率 e 的计算	68
7-3 等焓闪蒸	73
第八章 多组分精馏的最小回流比	83
8-1 多组分精馏各组分浓度在塔内的分布情况	83

8-2	最小回流比下的浓度分布	86
8-3	多组分精馏最小回流比的计算	87
第九章	加料位置对设计型和操作型精馏塔的影响	94
9-1	加料位置对双组分精馏的影响	94
9-2	加料位置对多组分精馏的影响	97
第十章	多级多组分分离过程的模拟计算方法简介	101
10-1	数学模型	101
10-2	计算方法的分类	103
10-3	几种严格计算方法简介	104
第十一章	化学吸收	119
11-1	绪言	119
11-2	物理吸收概述	119
11-3	化学吸收	121
第十二章	应用化工原理理论知识解决工程实际问题的几个例子	132
12-1	管路的安装问题	132
12-2	应用所学流体输送和传热章知识解决工程实际问题	134
12-3	应用性能负荷图分析工程具体问题	135

第一章 从相似的概念讲述直管中的摩擦阻力因素

50年代初期,各校普遍采用卡萨特金编著的“化工过程及设备”作为化工原理课程的教材。教师一般都应用相似理论导出直管中的摩擦阻力因素 λ 、对流传热系数 α 以及传质膜系数 k_G (或 k_L)的关联式。学生反映难点太集中,不易接受。60年代以后,出现了另一种倾向。国内出版的各种教材,在分析上述问题时,几乎都是运用因次分析的方法。我认为相似的概念对学生尤其对教师在进一步理解某些问题(例如离心泵的相似和比转数,离心通风机的无因次特性曲线等)的本质,处理实验研究中的某些问题,是一种有力的工具。根据多年的教学经验,我认为苏联教材在这一问题的处理上,过分偏重了微分方程式的推导,无形中分散了对基本概念应有的注意,使学生抓不住问题的实质。如果能在讲授中,加强基本概念的叙述,学生还是不难理解的。

1-1 直管中流体作层流和湍流流动时力的平衡

无论流体在管内作层流或湍流流动,其阻力损失的通用表达式,可用范宁公式表之,即:

$$\Delta p_f = \lambda \cdot \frac{l}{d} \rho \frac{u^2}{2} \quad (1-1)$$

式中 Δp_f ——阻力损失, N/m^2 ;

λ ——摩擦阻力因素^①;

l 、 d ——管长和管内径, m ;

ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

u ——管内平均流速, m/s 。

一、管内层流时力的平衡和摩擦阻力因素

层流流动时,管内流体质点沿 x 方向作直线运动,所以管内流动的流体就好像一层层同心圆筒状的流体层,以不同速度平滑地向前流动,如图1-1所示。中心处流速最大,愈靠近壁面,流速愈小。

根据力的平衡

$$\Delta p \cdot \pi r^2 + \mu(2\pi r l) \frac{du}{dr} = 0 \quad (1-2)$$

式中 r ——管中心至流层的距离, m ;

τ ——流层表面的剪切应力, N/m^2 ;

u ——点速度, m/s ;

Δp ——阻力损失, N/m^2 , $\Delta p = p_1 - p_2$ 。

通过积分求得速度沿管径的分布、平均速度 u ,找出 Δp_f 与管壁剪切应力 τ_w 间的关系,可得哈根-泊谟叶公式:

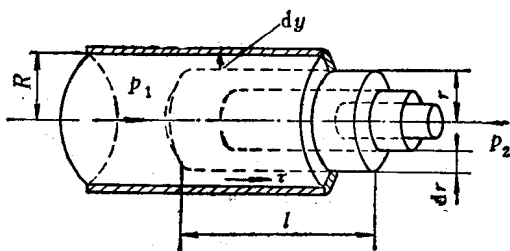


图 1-1 流体在管内分层流动示意图

① 式1-1中的 λ ,有些书上用 $4f$, f 称为范宁因素,注意 f 为 λ 的 $1/4$ 。

$$\Delta p_t = \frac{32\mu l u}{d^2} = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{u^2}{2} \quad (1-3)$$

$$\text{式中 } \lambda = \frac{64\mu}{du\rho} = \frac{64}{Re},$$

d ——管内径, m。

二、管内湍流时力的平衡

当流体作湍流运动时,除了主流方向的运动外,还叠加有复杂的涡流运动,它给予流体微团垂直于主流方向的分速度,使得微团相互撞击、混杂。因而任一位置上流体微团的瞬时速度,不论在大小或方向上都不断随时间而随机地变化,这种现象称为速度的脉动。正如杂乱的气体分子运动造成相互碰撞,使每个分子的速度都随时迅速变化一样。因而湍流时,即使就流体运动的整体来说是稳定的,但每个微团的运动却是不稳定的、无规律的。常用的处理方法是取按时间的平均值。例如,沿 x 向的平行流,可对某一位置的 x 向瞬时速度 $\dot{u}_x$,按时间取平均值,称为时均速度,记作 $\bar{u}_x$;垂直于主流方向(即 y 向)的时均速度 $\bar{u}_y = 0$ 。如果各不同位置的 $\bar{u}_x$ 在一系列的时间间隔内是恒定的,则称该湍流场是稳定的;对各点 $\bar{u}_x$ 相等的面可划分作一个流层;为方便起见, $\bar{u}_x$ 在 y 向的分布及梯度,可分别记为 $\bar{u}_x = \bar{u}_x(y)$ 及 $\frac{d\bar{u}_x}{dy}$,其中 y 为壁面至流层的距离。若管半径为 R ,则 $y = R - r$ 。通过某一位置的 x 向与 y

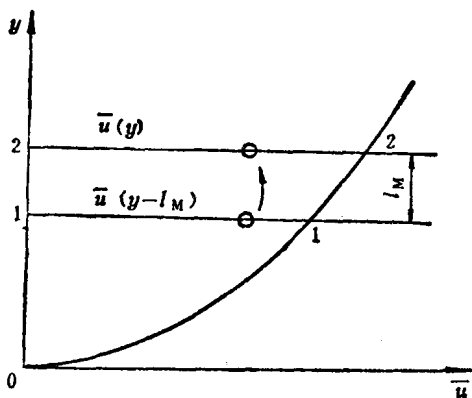


图 1-2 湍流动量传递示意图

向的瞬时速度,可分别表达为:

$$\dot{u}_x = \bar{u}_x + u'_x$$

$$\dot{u}_y = \bar{u}_y + u'_y$$

式中 u'_x 、 u'_y ——分别为脉动速度在 x 向和 y 向的分量, m/s。

它们时大时小、时正时负,而时均值 $\bar{u}'_x = 0$, $\bar{u}'_y = 0$ 。但其绝对值的时均值 $|\bar{u}'_x|$ 、 $|\bar{u}'_y|$ 不为零,它们反映速度振幅的大小。

图 1-2 所示,在主流为 x 向的湍流场内取两个流层 1-1 及 2-2,其时均速度分别为 $\bar{u}_x(y-l_m)$ 和 $\bar{u}_x(y)$ 。设想由于 y 向的脉动速度,使流体微团自流层 1-1 以速度 $\bar{u}_x(y-l_m)$ 沿与流层垂直的方向往上运动了距离 l_m ,在到达 2-2 层前保持原有的速度,一旦到达 2-2 层后,与该层流体混合,并获得该层同样的速度 $\bar{u}_x(y)$,即 x 向时均速度变化了 $\Delta \bar{u}_x$,这一距离 l_m 称为普兰德(Prandlt)混合长度。

$$\begin{aligned} \Delta \bar{u}_x &= |\bar{u}_x(y) - \bar{u}_x(y-l_m)| \\ &= \left| \bar{u}_x(y) - \left[\bar{u}_x(y) + \bar{u}_x(y)' \frac{(-l_m)}{1!} + u_x(y)'' \frac{(-l_m)^2}{2!} + \dots \right] \right| \\ &\approx \left| l_m \frac{d\bar{u}_x}{dy} \right| \end{aligned} \quad (1-4)$$

若 y 向的平均脉动速度为 $|\bar{u}'_y|$,流层的面积为 A ,流体的密度为 ρ ,则在时间 θ 内,两流层间交换的流体质量为 $\rho \cdot |\bar{u}'_y| \cdot A \cdot \theta$,传递的动量为 $\rho \cdot |\bar{u}'_y| \cdot A \cdot \theta \cdot \Delta \bar{u}_x$ 。根据动量原理,由此而作用于两流层上的一对剪切力 F_E ,可按下式求出:

$$F_E \cdot \theta = \pm \rho \cdot |\bar{u}_y'| \cdot A \cdot \theta \cdot \Delta \bar{u}_x$$

$$\text{或} \quad \tau_E = F_E / A = \pm \rho \cdot |\bar{u}_y'| \cdot \Delta \bar{u}_x = \pm \rho \cdot |\bar{u}_y'| \cdot l_M \frac{d\bar{u}_x}{dy} \quad (1-5)$$

式中 F_E ——涡流剪切力（或惯性阻力），N；

τ_E ——涡流剪切应力（或惯性剪切应力），N/m²。

根据力的平衡，可写成：

$$\Delta p_t \cdot \pi r^2 + \mu A \frac{d\bar{u}_x}{dy} + \rho \cdot l_M \cdot |\bar{u}_y'| \cdot A \cdot \frac{d\bar{u}_x}{dy} = 0 \quad (1-6)$$

式中左侧第一项为总压力降，第二项为粘性阻力，第三项为惯性阻力。上式只有作适当简化后，才能用解析法导出摩擦因素和 Re 的关系。如果描述现象特征的微分方程式很复杂，则往往无法用解析法求得其解。

长期以来，人们采用另一种方法，即单纯实验的方法：先找出哪些量与阻力损失（用符号 w_t 表示）有关，改变各有关参数，并将实验数据整理成图线或经验公式，以便推广应用。但是采集和整理实验数据，若没有理论作为指导，所得的图线或经验公式，在应用时局限性很大。

例如，已知阻力损失 $w_t \left(= \frac{\Delta p_t}{\rho} \right)$ ，与流体的粘度 μ 、密度 ρ 、管内平均流速 u ，以及管长 l 和管径 d 等变量有关，即：

$$w_t = f(\mu, \rho, u, l, d, \dots) \quad (1-7)$$

如果在 $\phi 25 \times 2.5$ 、长为 10m 的钢管中，用 20℃ 的水进行实验。改变流速 u ，可以测出一系列的阻力损失 w_t ：

u	u_1	u_2	$u_3 \dots \dots$
w_t	w_{t1}	w_{t2}	$w_{t3} \dots \dots$

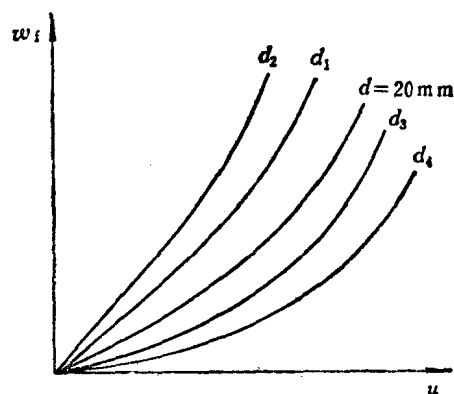


图 1-3 $w_t \sim u$ 曲线

若将这些数据进行标绘，可以得出图 1-3 中 d （内径）= 20mm 时的 $w_t \sim u$ 曲线。这根曲线只有在 $d = 20\text{mm}$ ， $l = 10\text{m}$ ，20℃ 的水这一特定条件下才适用。如管内径改变，上述曲线就不再适用了。当然可在不同内径的直管中做实验，并可如图 1-3 所示，标绘出不同内径下 $w_t \sim u$ 的一组曲线。可是如果管长 l 改变了，水温改变了，或是处理的流体不是水而是其他物料，那就不知道要标绘多少组曲线才够用。不仅实验工作量过大，而且大本曲线图查阅也极不方便。可见没有理论指导的实践，往往带有很大的盲目性。

模型放大也存在类似的问题。在实验室小型实验中取得的满意结果，应按什么原则来进行放大？举个简单例子：在内径 $d = 20\text{mm}$ 的管子中进行实验，流体的流速 $u = 0.1\text{m/s}$ ，粘度 $\mu = 0.001\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ，密度 $\rho = 800\text{kg}/\text{m}^3$ 。如果随意将实验结果按比例放大（物性 μ 和 ρ 当然不能变），例如内径放大 10 倍（ $d' = 200\text{mm}$ ），流速提高 10 倍（ $u' = 1\text{m/s}$ ）行不行？只要用 Re

来校核一下可以知道：在小实验时 $Re = \frac{0.02 \times 0.1 \times 800}{0.001} = 1600$ ，而放大后的 $Re' =$

$\frac{0.2 \times 1 \times 800}{0.001} = 160000$ 。流动状态由层流变为湍流，这样的放大，决不是相似放大。可见，

现象的相似是有一定条件的。下面简要地对相似理论进行讨论。

1-2 相似的基本原理

一、几何相似

我们可以利用已经学过的三角形相似来分析几何相似的基本点。在图1-4中所示的一组相似三角形中：

$$\frac{l_1}{l'_1} = \frac{l_2}{l'_2} = \frac{l_3}{l'_3} = a_{AB} \quad (1-8)$$

$$\frac{l_1}{l''_1} = \frac{l_2}{l''_2} = \frac{l_3}{l''_3} = a_{AC} \quad (1-9)$$

式中 a_{AB} 、 a_{AC} 是两相似三角形各对应边之比，称为相似常数。

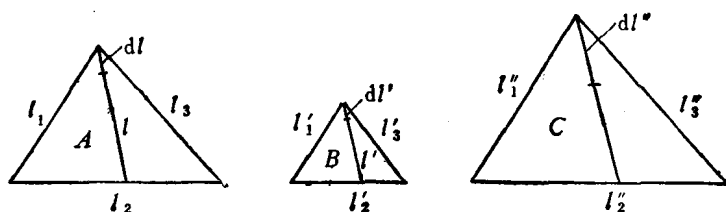


图 1-4 几何相似三角形

式1-8、1-9虽是三角形相似的必要条件，但不是相似三角形的共性，因为 $a_{AB} \neq a_{AC}$ 。而同一三角形的两个几何量之比（例如 l_1/l_2 ），与任一相似三角形相应几何量之比（此处为 l'_1/l'_2 ）必定相等，即

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{l'_1}{l'_2} = \frac{l''_1}{l''_2} = \text{定数} = i_{11} \quad (1-10)$$

$$\frac{l_2}{l_3} = \frac{l'_2}{l'_3} = \frac{l''_2}{l''_3} = \text{定数} = i_{12} \quad (1-11)$$

$$\frac{l_1 - l_2}{l_2} = \frac{l'_1 - l'_2}{l'_2} = \frac{l''_1 - l''_2}{l''_2} = \text{定数} = i_{13} \quad (1-12)$$

或
$$\frac{\Delta l}{l_2} = \frac{\Delta l'}{l'_2} = \frac{\Delta l''}{l''_2} = \text{定数} = i_{14} \quad (1-12 a)$$

或
$$\frac{dl}{l_2} = \frac{dl'}{l'_2} = \frac{dl''}{l''_2} = \text{定数} = i_{15} \quad (1-12 b)$$

式中 i_{11} 、 i_{12} 、 i_{13} 、 i_{14} 、 i_{15} 等是同一三角形中两个几何量之比，在所有相似三角形中，其值相等，称为相似定数。

可见相似常数与相似定数的概念不同。在相似现象中，对应点上相似常数相等；但当一对相似现象为另一对相似现象替代时，相似常数值也将改变（前例中 $a_{AB} \neq a_{AC}$ ）。相似定数则表示某系统中在一定相应位置上，两个同类量之比，当一个现象转换到另一相似现象时，相似定数不变。

几何相似是物理现象相似的先决条件。

二、物理相似

几何相似的概念可以推广到物理现象上去。在进行着物理过程的系统中，若其几何上相似，且系统中各对应点或对应部分上，各物理量之比为常数时，则称为物理相似。

若以 $U_1, U_2, U_3, \dots, U'_1, U'_2, U'_3, \dots$ 表示两相似系统在各对应点上的任一物理量，则

$$\frac{U_1}{U'_1} = \frac{U_2}{U'_2} = \frac{U_3}{U'_3} = \dots = a_U \quad (1-13)$$

式中 U ——任一物理量；

a_U ——相似常数，下标 U 表示任一物理量。

物理过程常随时间而进行和发展的；因而两现象相似时也一定具有时间上的相似。所谓时间相似是指几何相似的系统中，其对应的各点或各部分沿几何相似的轨迹运动，且通过几何相似路程所需时间之比为一常数。

若以 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta'_1, \theta'_2, \dots$ 表示两系统内，物体运动的相应时间，则：

$$\frac{\theta_1}{\theta'_1} = \frac{\theta_2}{\theta'_2} = \dots = a_\theta \quad (1-14)$$

式中 θ ——时间，s；

a_θ ——表示时间相似的常数。

以流体质点在几何相似的叶轮 A, B 中沿着几何相似的路程运动的情况为例，两叶轮中的相对速度 w, w' 具有不同的但却是相似的变速度。如图 1-5 所示，在相应点 1, 0, 2……上，其相对速度 w 和 w' 必互成比例，即

$$\frac{w_1}{w'_1} = \frac{w_0}{w'_0} = \frac{w_2}{w'_2} = \dots = \frac{w}{w'} = a_w \quad (1-15)$$

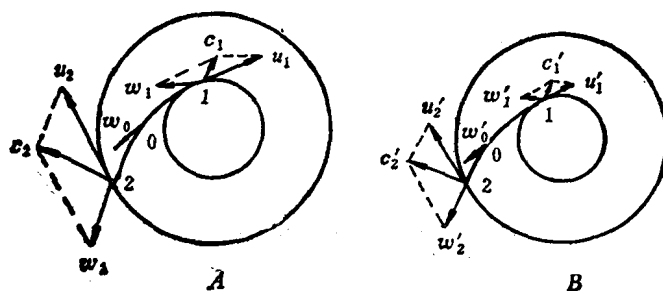


图 1-5 相似泵的速度三角形

且由点 1 至点 0 所需的时间 θ_1 与 θ'_1 ，由点 0 至点 2 所需的时间 θ_2 与 $\theta'_2, \dots$ ，等亦成比例，即

$$\frac{\theta_1}{\theta'_1} = \frac{\theta_2}{\theta'_2} = \dots = \frac{\theta}{\theta'} = a_\theta \quad (1-14a)$$

任何物体的运动, 在某一瞬间的平均速度都可用下列微分方程式来表示:

$$u = \frac{dl}{d\theta} \quad (1-16)$$

必须指出: 微分方程反映了一类过程的普遍规律。要将一个具体过程从中规定出来, 必需补充必要和充分的条件, 以使微分方程的解答具有“单值性”, 这些附加条件称为单值条件。单值条件规定了过程进行的具体条件, 通常包括过程进行的空间范围, 参与过程物系的物理性质, 过程在边界上和时间上的特点等。对式1-16而言, 单值条件即为 l 和 θ 。

在叶轮 A 中, 其方程式为

$$u = \frac{dl}{d\theta} \quad (1-16 a)$$

在叶轮 B 中, 其方程式为

$$u' = \frac{dl'}{d\theta'} \quad (1-16 b)$$

既然这两运动是相似的, 存在着式1-15、1-14 a 以及几何相似的关系, 即 $\frac{u}{u'} = a_u$,

$\frac{\theta}{\theta'} = a_\theta$, $\frac{l}{l'} = a_l$, 代入式1-16 a, 得:

$$a_u u' = \frac{a_l dl'}{a_\theta d\theta'} \quad (1-16 c)$$

$$\text{或} \quad \frac{a_u a_\theta}{a_l} u' = \frac{dl'}{d\theta'} \quad (1-16 d)$$

比较式1-16 b与1-16 d, 得如下关系:

$$\frac{a_u a_\theta}{a_l} = 1 \quad (1-17)$$

再将式1-15, 1-14 a 等相似关系代入式1-17中, 得:

$$\frac{\frac{u}{u'} \cdot \frac{\theta}{\theta'}}{\frac{l}{l'}} = 1 \quad (1-17 a)$$

$$\text{或} \quad \frac{u\theta}{l} = \frac{u'\theta'}{l'} \quad (1-17 b)$$

$\frac{u\theta}{l}$ 是描述该物理现象的单值条件所组成的无因次数群, 是不同物理量间的乘积, 在相

似系统的对应点上其数值相等, 称为相似准数。而在几何相似中讲到的相似定数则是两个几何量的比值。

由上面的叙述, 可以得出以下结论, 即第一、第二相似定理。

(1) 现象的相似首先是系统的几何相似, 同时在其相应点上, 各物理量及时间等单值条件的比值相等 (即单值条件相似)。由于自然界的各种现象总是服从于某一 定的规律, 并可用微分方程式来表示。而应用相似常数的转换得知: 当现象相似时, 由微分方程转换所得的相似准数的数值相等。以上即为相似第一定理的内容。相似第一定理告诉我们在实验中应测定包含在相似准数中的那些量。

(2) 某一现象各物理量之间的函数关系, 可表示成相似准数之间的函数关系。例如, 描述物体运动的式1-16, 可用物理量之间的函数关系 $f(u, l, \theta) = 0$ 表示, 也可用准数的函数关系 $\phi\left(\frac{u\theta}{l}\right) = 0$ 表示。以上是相似第二定理的内容。相似第二定理告诉我们应以相似准数间关系来处理实验数据。

有关相似第一、第二定理的详细推导, 可参阅有关专著^[1]。

物理相似除时间相似外还包含:

(1) 运动相似 在图1-15相似泵的速度三角形中

$$\frac{u_1}{u'_1} = \frac{w_1}{w'_1} = \frac{c_1}{c'_1} = \frac{u_2}{u'_2} = \frac{w_2}{w'_2} = \frac{c_2}{c'_2} = \dots\dots = a'_u \quad (1-18)$$

式中 u —— 圆周速度, m/s;

w —— 相对速度, m/s;

c —— 绝对速度, m/s。

若有第三个相似泵其进、出口圆周速度、相对速度和绝对速度分别为 u''_1 、 w''_1 、 c''_1 , u''_2 、 w''_2 、 c''_2 , 则

$$\frac{u_1}{u''_1} = \frac{w_1}{w''_1} = \frac{c_1}{c''_1} = \frac{u_2}{u''_2} = \frac{w_2}{w''_2} = \frac{c_2}{c''_2} = a''_u \quad (1-19)$$

式1-18、1-19虽是两叶轮运动相似的必要条件, 但不是运动相似的共性, 因为 $a'_u \neq a''_u$ 。和相似三角形中相似定数相等的道理一样, 在相似系统中, 某一现象本身的两个速度之比, 必定等于另一现象中相应两个速度之比。

仍以流体在离心泵叶轮内流动的速度三角形为例 (参阅图1-5), 如果泵的叶轮是相似的, 则有:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{u'_1}{u'_2} = \text{定数} = i_1 \quad (1-20)$$

$$\frac{u_2}{c_2} = \frac{u'_2}{c'_2} = \text{定数} = i_2 \quad (1-21)$$

$$\frac{w_2}{c_2} = \frac{w'_2}{c'_2} = \text{定数} = i_3 \quad (1-22)$$

$$\frac{u_1 - u_2}{u_2} = \frac{u'_1 - u'_2}{u'_2} = \text{定数} = i_4 \quad (1-23)$$

$$\text{或} \quad \frac{\Delta u}{u_2} = \frac{\Delta u'}{u'_2} = \text{定数} = i_5 \quad (1-23 a)$$

$$\text{或} \quad \frac{du}{u_2} = \frac{du'}{u'_2} = \text{定数} = i_6 \quad (1-23 b)$$

式中: i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 、 i_5 、 i_6 分别为相应点的相似定数。

(2) 动力相似及能量相似 在相似系统中, 某一现象中本身两个力或能量之比等于另一系统中相应两个力或能量之比。例如:

$$\frac{\text{重力}}{\text{惯性力}} = \frac{F_g}{F_i} = \frac{F'_g}{F'_i} = \text{定数} \quad (1-24)$$

$$\frac{\text{总压力}}{\text{惯性力}} = \frac{P}{F_1} = \frac{P'}{F'_1} = \text{定数} \quad (1-25)$$

$$\frac{\text{总压力差}}{\text{惯性力}} = \frac{\Delta P}{F_1} = \frac{\Delta P'}{F'_1} = \text{定数} \quad (1-25a)$$

$$\frac{\text{惯性力}}{\text{粘滞力}} = \frac{F_1}{F_s} = \frac{F'_1}{F'_s} = \text{定数} \quad (1-26)$$

式中 F_s 、 F_1 、 P 、 ΔP 、 F_s 分别为某一现象中的重力、惯性力、总压力、总压力差和粘滞力，N； F'_s 、 F'_1 、 P' 、 $\Delta P'$ 、 F'_s 分别为另一系统中的重力、惯性力、总压力、总压力差和粘滞力，N。

三、边界和初始条件相似

边界条件相似包括：流体入口情况的相似，管子粗糙度的相似等。

对于不稳定现象，还应有初始条件的相似。

简单说来，相似的物理现象是指用同一方程式来描述的物理现象，并且有相似的单值条件和相同的边界和初始条件。

1-3 用相似的概念导出流体在管内作湍流时的摩擦阻力因素

按照上节阐述关于相似的基本原理，管内湍流的相似条件有：

一、几何相似

例如管长和管径之比 l/d 在相似系统中相等。

二、运动相似

某一系统中自身两个速度或速度差之比，等于相似系统中相应两个速度或速度差之比。

三、动力相似

如前所述，流体在直管中作湍流流动，可用式1-6来描述：

$$\Delta p_1 \cdot \pi r^2 + \mu \cdot A \frac{d\bar{u}_x}{dy} + \rho \cdot |\bar{u}'_y| \cdot A \cdot L_M \frac{d\bar{u}_x}{dy} = 0$$

式中第一、二、三项分别为总压力降、粘性阻力和惯性阻力。

式1-6可用相似常数的转换导出相似准数，在第五章对流传热的相似关系中，将采用此法导出准数。

(1) 对相似现象应满足动力相似，即：

$$\frac{\text{惯性力}}{\text{粘滞力}} = \text{定数} = i_1 \quad (1-26)$$

将相应量代入式(1-26)得：

$$\frac{\rho \cdot |\bar{u}'_y| \cdot A \cdot L_M \frac{d\bar{u}_x}{dy}}{\mu \cdot A \frac{d\bar{u}'_x}{dy}} = \frac{\rho |\bar{u}'_y| L_M}{\mu} = i_1 \quad (1-26a)$$

根据前述相似概念： $\frac{L_M}{d} = \text{定数}$ ； $\frac{|\bar{u}'_y|}{u} = \text{定数}$ 。将此关系代入式(1-26a)，得：

$$\frac{d u \rho}{\mu} = \text{定数} = Re$$

$$(2) \frac{\text{总压力差}}{\text{惯性力}} = \text{定数} = i_2$$

即

$$\frac{\Delta p_t \cdot \pi r^2}{\rho |\bar{u}'_y| l_M (2\pi r l)} \frac{d\bar{u}_x}{dy} = \frac{\Delta p_t \cdot r}{\rho |\bar{u}'_y| \cdot l_M (2l)} \frac{d\bar{u}_x}{dy} = \text{定数}$$

按相似原理: $\frac{r}{l} = \text{定数}$; $\frac{l_M}{dy} = \text{定数}$; $\frac{d\bar{u}_x}{u} = \text{定数}$; $\frac{|\bar{u}'_y|}{u} = \text{定数}$ 。将此关系代入式

1-25 a, 得:

$$\frac{\Delta p_t}{\rho u^2} = \text{定数} = Eu$$

其实, 这种由两种力之比来导出相似准数的方法, 可认为如前面几何相似所述, 由相似三角形两个几何量之比获得相似定数这一方法的推广。在一组流体流动的相似现象中, 惯性力与粘滞力之比以及总压力差与惯性力之比, 都是两种力之比, 因而也可认为是相似定数。虽然准数本身如前所述是由不同物理量所组成。

四、边界条件相似

如相对粗糙度 e/d (即粗糙度 e 与管径之比) 在相似系统中相等。

根据相似第二定理, 描述流体在导管中流动的函数关系式, 可由原来的单个变量间的关系:

$$f(\Delta p_t, d, u, \rho, \mu, l, e, \dots) = 0 \quad (1-27)$$

改写成准数关系式:

$$f\left(\frac{\Delta p_t}{\rho u^2}, \frac{du\rho}{\mu}, \frac{l}{d}, \frac{e}{d}\right) = 0 \quad (1-28)$$

其结果不仅可用数量较少的准数来表示流体在导管中的流动, 而且准数还反映了相似现象的共性, 即相似现象中相似准数相等。因而, 在进行了一定数量的实验后, 按准数关系整理所得数据, 可以推广到其他场合应用。

对于光滑管或相对粗糙度 e/d 一定的情况下,

$$f_1\left(\frac{\Delta p_t}{\rho u^2}, \frac{du\rho}{\mu}, \frac{l}{d}\right) = 0 \quad (1-28a)$$

写成显式关系

$$\frac{\Delta p_t}{\rho u^2} = f_2\left(\frac{du\rho}{\mu}, \frac{l}{d}\right) \quad (1-28b)$$

众所周知 Δp_t 正比于管长 l , 得:

$$\frac{\Delta p_t}{\rho u^2} = \frac{l}{d} \phi\left(\frac{du\rho}{\mu}\right) \quad (1-28c)$$

$$\text{阻力损失 } w_t = \frac{\Delta p_t}{\rho} = 2\phi(Re) \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (1-28d)$$

$$\text{式中 } \lambda = 2\phi(Re) = \frac{2\Delta p_t \cdot d}{\rho u^2 \cdot l} \quad (1-29)$$

λ 即摩擦因素, 亦为相似准数。对光滑管或相对粗糙度一定的管, λ 只取决于 Re 。因而, 在相似系统中, 若 Re 数相等则 λ 必相等。对相对粗糙度 e/d 不同的管子, 在确定 λ 值时,

还应考虑 e/d 的影响, 如一般教科书中采用的莫狄摩擦因素图所示。

小结一下:

1) 用同一方程式描述的物理现象, 当其单值条件相似, 并具有相同的边界条件和初始条件, 称为相似现象。

2) 相似系统中, 相似准数是无因次的, 且其数值相等。

3) 用物理量表示的函数关系, 可用准数间的关系表示。

1-4 流体阻力实验数据处理举例

我们在实验室中, 在内径为27mm, 长2.32m的钢管内, 先用20℃的空气进行试验: 改变流速 u , 测定阻力损失 Δp_t 。然后用20℃的水, 进行类似的测定。现场测得的实验数据, 列入下表:

	空 气				水				
$u(\text{m/s})$	18.7	15.8	14.2	10.4	1.89	1.67	1.345	1.18	0.84
$\frac{\Delta p_t}{\rho g} \times 1000 (\text{mm水柱})$	520	430	350	188	583	458	311	246	134
$\lambda = \frac{2\Delta p_t d}{\rho u^2 l}$	0.0377	0.038	0.0392	0.0415	0.0373	0.0375	0.0395	0.0405	0.043
Re	3460	28400	25600	18700	39000	34600	27900	24500	17400

如果不按照现象的共性来处理实验数据, 例如图1-6所示, 标绘 $\Delta p_t \sim u$ 的关系, 很明显, 用水进行试验得出的 $\Delta p_t \sim u$ 曲线和用空气得出的结果相差很远(图中为两条相距很远的曲线), 即用水作为介质得出的 $\Delta p_t \sim u$ 曲线, 不能推广应用到以空气为介质的 $\Delta p_t \sim u$ 关系上。若利用相似现象的共性-相似准数, 例如 λ 和 Re 来整理同样的数据, 如图1-7所示, 对

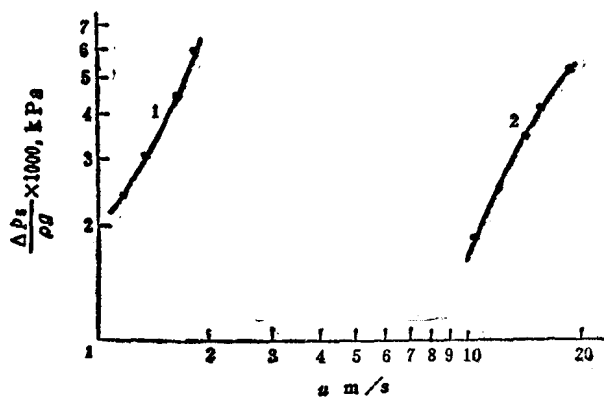


图 1-6 $\Delta p_t / \rho g \sim u$ 曲线

1—水; 2—空气

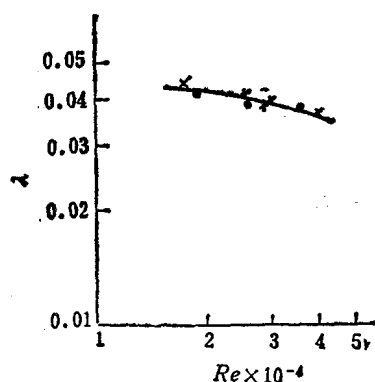


图 1-7 $\lambda \sim Re$ 曲线

λ 和 Re 进行标绘, 结果都落在同一根曲线上。由于在相似系统中 Re 相等时 λ 也相等, 不论是什么流体, 其温度、密度、粘度等物理量有多大差别, 只要 Re 一定, 可以通过图1-7查到相应的 λ 值, 再通过式1-21 d可以计算得到 Δp_t 。