

高等学校教学参考书

化工原理教与学

陈敏恒 方图南 丛德滋 编著

化学工业出版社

高等学校教学参考书

化工原理教与学

陈敏恒 方图南 丛德滋 编著

化学工业出版社
· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

化工原理教与学/陈敏恒等编. —北京: 化学工业出版社, 1996
(1998. 6 重印)

高等学校教学参考书

ISBN 7-5025-1596-8

I. 化… I. 陈… III. 化工原理 - 高等学校 - 教学参考资料
N. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 18936 号

高等学校教学参考书

化 工 原 理 教 与 学

陈敏恒 方图南 丛德滋 编著

责任编辑: 杨 菁

封面设计: 郑小红

*

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

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 8 字数 183 千字

1996 年 1 月第 1 版 1998 年 6 月北京第 2 次印刷

印 数: 3001—4500

ISBN 7-5025-1596-8/G · 417

定 价: 9.00 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

对于高校化工类学生和化学工程师来说,掌握化工原理课程内容的重要性是不言而喻的。这不仅由于单元操作在工业上的广泛应用,而且其中许多分析问题的方法和工程观点对实际工作和进一步学习都十分有用。本书的主要目的是从常用的单元操作中,提炼若干重要的工程观点以及处理工程问题的方法,同时提供某些具体材料以加深对有关内容的理解,适应学科和计算技术的发展。全书大体按一般化工原理教材的体系编写,以便于在校师生随教学进程参阅。对于已了解单元操作基本内容的在职工程技术人员,如一览全书,概梗地获取书中所述的方法论和观点也不无裨益。

本书是全国高校化工原理教学指导委员会确定编写的教学参考丛书之一,其大部分内容是按作者给优秀生班多年教学和教学研究的材料整理而成,书中 5·5 节由河北轻化工学院巫云龙、贺群英撰写,全书由谭天恩教授审定。编写过程中受到华东理工大学及有关院校同事的热情支持和鼓励,作者深为感谢。由于水平所限,书中难免偏颇、错误之处,请读者批评、指正。

作者

绪 论

1. 教学目的

化工原理(又称单元操作)属工程学科,它用自然科学的基本原理来分析和处理化工生产中的物理过程。化工原理的研究对象和研究方法与物理、物理化学等基础科学有明显不同。基础课中,较多地是以理想化的模型为研究对象,如物体在真空中的自由降落,理想气体的行为等都是采用理想模型的严密数学推理的方法。而工程学科是以实际工程问题为研究对象。被加工物质的千变万化,设备几何形状的千姿百态,使人们面临一个复杂、但却是真实的世界,要求人们采用不同于基础学科的研究方法,即处理实际问题的工程方法。这一方法论的转变对于从低年级学习基础课转到高年级学习技术课的学生来说尤为重要。因此,化工原理课程的教学目的不仅在于掌握丰富的工程知识和计算方法,而且要在对具体材料的理解中不断地总结、归纳考察工程问题的观点和处理实际问题的基本方法。唯其如此,才能了解这些计算方法的实质,在科学高速发展、内容不断扩展的时代里加快知识的积累和更新,才能从具体工作经验中把握事物变化的基本规律,把经验与理论融合于一体。就事论事地交待和学习材料,还是以典型材料为依据突出工程观点和方法的学习,这是区分单纯传授(学习)知识与着重培养(训练)能力的重要分界。

化工原理中所述的各单元操作都是根据一定的物理或物理化学原理以达到某个特定的工程目的,学习时可对每个单元操作从发展、选择、设计和操作四个方面去探讨。

发展 是指如何根据某个物理或物理化学原理开发成为一个单元操作。寻本求源,这应是教与学的核心,也是培养具有创新能力人材的重要一环。就分离操作而言,物性的差异是实现分离的依据,也就是存在分离的可能性,但它并不能直接达到高纯度的分离,这是说可能性与现实性之间还有一定的距离。工程工作者的任务就在于将可能性变为现实性,这就是发展或开发的意义所在。具体地说,如颗粒尺寸大小不同,这是颗粒分级的基础,但如何实现清楚的分级;溶解度的差异、挥发度的差异是吸收、精馏过程的基础,但如何实现高纯度的分离。这就需要工程技术人员调动有效的工程手段,以弥合可能性与现实性、过程内在依据与工程目的之间的间隙,这恰恰是各单元操作的核心,但往往被人们所忽视。

选择 是工程技术人员解决实际问题的必由之路。为了达到或实现某一工程目的,能否对过程和设备作合理的选择和组合,这是检验人们对各单元操作是否牢固掌握的重要标志。选择要合理,它既意味着科学性,也意味着经济性。

设计 其含义除了对已经掌握了性能的过程和设备作直接的设计计算外,还包括对那些性能尚不十分掌握的过程和设备通过必要的实验,测取设计数据,作逐级放大。因此,除掌握设计计算方法外,还要掌握如何经济有效地组织实验以达到测取设计数据或放大的目的。不同的实验目的,可以通过不同的实验方法予以实现,实验必须以实验的理论来指导。

操作 是现场工作人员必备的知识。不在现场当然难于全面掌握操作知识,但学习者可以根据自己对基本原理的认识而预测设备的操作性能;如何根据基本原理发现操作上可能出现的各种不正常(操作的)现象,寻找其原因及可能采取的调节措施。由此可见,操作问题的讨论可以检验基本原理掌握的程度以及运用基本原理解决问题的能力。

2. 教学内容的组织

为达到上述目的,关键在于组织内容。

(1)更新与继承

从学科体系上说化工原理是化学工程的基本原理,其理论内容应包括化工单元操作、化学反应工程和化工传递过程等三个部分。目前的课程体系仅局限于各单元操作,反应工程和传递过程都单独设课。但化工原理的内容仍然应充分考虑后两门课的发展,密切与其联系和衔接。

从历史发展看,反应工程和传递过程的发展曾大大深化人们对各单元操作的认识,推动单元操作的发展。例如,返混的概念起源于反应工程,但其基本观点适用于所有连续的化工过程,包括单元操作。又如数学模型方法,其产生、发展和成熟都是近廿多年的事,但这一方法的基本要素在化工原理的各个单元操作中早已应用,只是以往没有上升到模型方法论的高度予以阐述。可以说,现代化学工程领域中的许多新观点、新方法都可以在化工单元操作的处理中找到其萌芽。化工原理的内容理应反映化学工程科学的这些新理论、新概念。教育要面向现代化,课程内容必须现代化。就当前化工原理教学内容现代化而言,重要的一点就是将近代化学工程学科的发展渗透到各个传统单元操作中去。

另一方面,现有的化工原理仍然继承了大量较成熟的单元操作知识。但这些内容也需要以重要的工程观点来组织和取舍,用学科发展的线索贯穿所选用的各种材料。

(2)内容的共性与特殊性

各单元操作乍看似乎彼此独立,但这只是就各单元操作的工程目的和其所依据的基本原理而言的。实际上在内容和方法上都存在着许多共性,否则它不可能成为一门统一的学科。学习过程中要十分注意各单元操作之间的这些共性。然而,由于各单元操作在各自发展中的历史原因,许多本应统一和一致的方法和名词却并不一致。这类现象宜逐步纠正。例如,同是多级接触过程的数学描述,精馏中是以塔段为控制体而萃取中则以萃取级为控制体。其所以出现这种不一致是由于精馏中过去一直采用梯级作图法处理,故以塔段为控制体作物料衡算,现在由于计算机的使用,也同样使用塔板为控制体。因此,精馏中以塔段为控制体的方法是历史遗留的痕迹。

在充分体现各单元操作统一性的基础上,还要更多地注意各单元操作各自的特征。要着重分析吸收和传热的差异,精馏与吸收的差异,萃取与吸收的差异,干燥与吸收、精馏的差异等,并由这些差异中引出不同的工程处理方法。对各单元操作作这样统一性和特殊性的反复比较,以揭示学科知识继承和发展的辩证关系,也使课程内容有层次、有重点地展开,不断深化,不断提高。

(3)关于化工设备

每个化工单元操作都包括过程及设备两个部分。掌握化工设备不能满足于结构和优缺点的单纯罗列,还可以按如下程式展开对设备的讨论:

设备的流体力学基础;

工业设备性能的评价标准;

影响设备性能的有利和不利的工程因素;

调动有利的工程因素,抑制不利因素的方法,使设备结构得以改进;

工业设备的设计方法。

化工原理教与学常存在重过程、轻设备的问题,其根本原因是缺乏对实际设备的感性认识和对有关流体力学知识的了解,对设备难以进行深入的分析。虽然目前的学科水平还难以对各

种设备的性能作出深入的解释,但这不排斥选择几个典型和重要的设备作较深刻的分析。例如对板式塔作气液两相流动和接触状态的分析,可以使许多现有的经验得到科学的解释,深入了解设备的性能,这样的设备学习就不致枯燥乏味。

3. 教学方法

(1) 课堂教学

课堂教学内容的安排与教材内容的体系未必相一致,只有破除这个“一致”才能避免那种照本宣科式的教学。对于化工过程的教与学可以采用如下的步骤展开:

过程分析 → 过程的数学描述 → 实例分析

这种方式体现了认识从定性、定量到应用的三个不同层次。在过程分析中,是以单元操作的物理或物理化学原理为起点,以工程目的为终点,暂时摆脱定量的公式,充分运用逻辑思维和推理,提出问题,讨论问题和解决问题。以吸收过程分析为例可作如下安排。

吸收的工程目的:气体混合物的分离,用以提纯气相产物或回收气体中的有用物。

吸收所依据的物理化学原理:组分溶解度的差异。

完整的工业吸收流程:实现高纯度分离的工程措施,把吸收和解吸作为一个整体,了解各种解吸方法。

吸收过程的经济性:达到工艺目标基础上的吸收剂的选择,解吸方法的选择以及基于提高过程经济性而设想的种种吸收流程。

吸收过程的操作特性和操作参数:温度、压力、吸收剂流量等参数对过程的影响。

通过以上的过程分析不仅可以定性地掌握吸收操作的全貌,并可以锻炼分析问题的能力。

对任一过程进行数学描述的方法,不外是取控制体列衡算方程(如力平衡或动量衡算、热量衡算、物料衡算),建立过程的特征方程(如流体的本构方程、相平衡方程、传递速率方程),然后联立求解,并将结果整理成便于使用的形式。这里着重弄清过程数学描述时所遇到的困难,以及为克服这些困难所采用的技巧,如过程的简化与分解等。这是各种工程方法的精髓。

在化工原理课程中,各单元操作的数学描述都采用了各种工程处理方法,透彻地弄清这些处理方法的实质,是课程教学是否抓住根本的关键所在。对工程处理方法的了解不外包括三个方面:对过程进行定量描述所遭遇的困难;采用此工程处理方法的基础或前提;采用此工程处理方法欲达到的目的。

例如,引入理论板和板效率的概念,一方面固然是由于板上传质速率问题过于复杂,一时难以弄清,可以说这是出于无奈;另一方面或者说更重要的方面,是为了将过程和设备加以分解。理论板数是纯过程的特征,而板效率则包括设备的特征。这样的分解对处理工程实际问题带来了极大的方便,使人们有可能在未确定设备型式之前先进行过程计算,然后由计算结果确定设备的选型。所以,把塔板上的传质过程分解为理论板和板效率是一种技巧,是一种科学的工程处理方法。传质单元数和传质单元高度概念的引入也是类似的技巧。

通过上述的过程分析和数学描述,可以了解过程的全貌和理解工程方法的实质。在此基础上再通过教师的介绍或阅读参考书刊、实习等以了解一些解决工程问题的实例,不但有利于加深对理论和方法的理解,而且受到生动、具体地分析问题、解决问题能力的锻炼,这种实例分析在教与学过程中是十分重要的。

(2) 自主学习

目前我国的课堂教学通常有三种形式:听课-复习;预习-听课-复习;自学-听课-复习。应根据不同的课程和具体情况采用不同的教、学方法。

自学是真正掌握课程内容的关键,也是在职人员知识更新的必由之路,所以要大力提倡。但在同一时期内不可能每门课都搞自学。对于非主干课程一般只能用第一、二种学习形式,但对主干课则可以要求以自学为主,采用自学-听课-复习的教学方式,这种方式自然对师、生双方都提出了更高的要求,但可以大大提高教学效果,减少课堂学时。

(3)作业

化工原理课配有许多习题作业,这对于牢固地掌握理论知识,提高运算能力是十分必要的。但由于计算繁复,往往要费大量的课外时间,所以需要对习题和作业进行精选。这里提出两个选题标准:一是启发思维,每一道题都有助于深入、定量地掌握某个概念、某个观点或某种工程处理方法;另一是真实性,通过习题了解生产实际中可能遇到的问题(包括设计型和操作型问题),从而使习题成为在校学习期间理论联系实际的一个窗口。

鉴于计算技术的发展,有必要选择若干大型习题用计算机辅助求解。这种计算有助于定量地探索某些无法直观判断的问题,特别是一些操作型问题,如多种操作方案的对比选优等。这是课堂教学的重要延伸,也使化工原理教学摆脱过于简化的状态。

(4)实验

实验是学习和研究问题的重要环节,既是训练实验技巧和动手能力、也是培养理论联系实际能力的重要途径。实验内容的选择要注意以下两个标准:一是如何运用理论组织实验、测取设计数据;二是运用理论对操作进行优化。在改造原有实验时,也可参照这两条标准,以更好地发挥实验的效果。

自学、习题、实验构成了课程教学的另一个重要方面。如同课堂教学要发挥教师的主导作用一样,在自学、习题、实验这些方面则要发挥学生的自主作用,充分调动学生的积极性,自主不是放任自流,自主更需要指导。在课外组织学习兴趣小组作专题阅读或实验研究,是因材施教、对学生进行分流导向的好方法。它既可获得对教学的反馈信息,又可通过兴趣小组成员的切身体会去影响、带动其他同学的学习。当然指导的形式是多种多样的,重要的是要确立学生自主学习的思想,不包办代替。学生要克服依赖教师、被动学习的习惯。

成功的化工原理教学必须先对课程的全貌和性质有一定的了解,才能在教与学的全过程中作出计划,主动参与各个教学环节。

内 容 提 要

本书介绍定量解析化工单元操作时所采用的各种工程处理方法、重要的工程观点、以及教学和工程实践中的常遇问题。全书共分 13 章,包括:流体流动、流体输送机械、液体的搅拌、流体通过深颗粒层的流动、颗粒的沉降、传热、蒸发、气体吸收、液体精馏,板式塔、液-液萃取,热质同时传递过程、固体的对流干燥。

本书可作高等学校或同类学校化工原理的教学参考书,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

绪论

第1章 流体流动	1
1.1 流体流动现象的重要性	1
1.2 流体宏观流动与固体运动规律的比较	1
1.3 流体静力学的两个主要结论	3
1.4 机械能守恒	3
1.5 动量守恒	4
1.6 流动的内部结构	7
1.7 流体在圆管内作层流流动时的阻力——解析法	7
1.8 直管湍流阻力的实验研究——黑箱法	9
1.9 用数学模型法研究直管湍流阻力	10
1.10 设计型和操作型问题的划分	14
1.11 虚拟压强的应用	18
1.12 复杂管路的计算方法	21
第2章 流体输送机械	25
2.1 目的和方法——过程分解	25
2.2 离心泵向液体提供势能	26
2.3 泵的效率	28
2.4 离心泵的比例定律	29
2.5 泵的安装高度	30
第3章 液体的搅拌	32
3.1 混合过程的定性分析	32
3.2 搅拌装置的功能和能量分配	32
3.3 搅拌装置的放大	33
第4章 流体通过颗粒层的流动	34
4.1 固定床的流动阻力——数学模型法	34
4.2 关于当量和平均的方法	37
4.3 床层空隙率和比表面积的重要性	39
4.4 欧根方程的讨论	40
4.5 间接实验——参数综合法	41
4.6 加快过滤速率的途径	43
第5章 颗粒的沉降	46
5.1 两类流动问题——内部流动和外部流动	46
5.2 表面曳力与形体曳力	46
5.3 惯性力与粘性力	47

5.4	沉降运动——极限处理方法	48
5.5	阻力系数的变化规律	51
第6章	传热	55
6.1	对流给热过程	55
6.2	传热过程的数学描述和工程处理方法	57
6.3	关于传热计算	59
6.4	传热速率的讨论	61
第7章	蒸发	62
7.1	蒸发过程的经济性	62
7.2	蒸发设备的生产强度	64
7.3	多效蒸发的计算方法——多级过程的数学描述	64
7.4	蒸发器的操作周期	66
第8章	气体吸收	69
8.1	吸收过程的定性分析	69
8.2	气液相平衡与吸收过程的关系	70
8.3	对流传质系数的讨论	72
8.4	低浓度吸收的假定与变量分离	73
8.5	吸收过程的设计和操作问题的分析	75
8.6	返混的观点	77
8.7	关于高浓度气体吸收	79
8.8	分子扩散的两种处理方法	80
第9章	液体精馏	84
9.1	从传质角度理解精馏原理	84
9.2	精馏过程的数学描述——元过程方法	86
9.3	精馏过程设计中的两个重要观点	87
9.4	精馏操作讨论	90
第10章	板式塔	92
10.1	设计目标——从实际需要出发	92
10.2	设计原则——从传质速率的规律出发	93
10.3	工程因素——基础研究者的任务	93
10.4	不同对策——发明者的创造	95
第11章	液-液萃取	97
11.1	萃取过程与吸收过程的比较	97
11.2	部分互溶物系多级萃取过程的数学描述	99
11.3	萃取设备与气液传质设备的差异	100
11.4	逆流萃取的实验模拟	101
11.5	重要的工程措施——回流的普遍性	102
第12章	热、质同时传递过程	105
12.1	热、质同时传递过程的特点	105
12.2	绝热饱和温度和湿球温度	107

12.3	过程的计算方法.....	108
第 13 章	固体的对流干燥	111
13.1	湿空气的性质.....	111
13.2	水分在气-固两相间的平衡与干燥速率曲线	112
13.3	干燥过程的热分析与节能措施.....	112

第1章 流体流动

1.1 流体流动现象的重要性

化工生产涉及的物料大部分是流体,涉及的过程绝大部分是在流动条件下进行的。流动阻力及由此引起的许多实际问题是“流体流动”中最基本的现象,广泛所见的泵送和许多计量方法都直接运用着流体力学的基本原理。

许多化工过程的进行在很大程度上受流体在设备内流动状况的影响。各种换热器、塔、流化床和反应器都期望流体沿流动截面有均匀的速度分布,流动的不均匀性会严重地影响反应器的转化率、塔和流化床的操作性能。因此,流速的均布已成为许多化工过程共同关心的流动问题。

以往常笼统地将工业设备与小型试验设备之间性能的差异归之为“放大效应”。这一名词实际上并没有对事物的本质作出任何分析和解释。放大效应往往是由于大、小设备在流体流动状况上的不同导致传热、传质及反应结果的差异。填料塔的直径不同,液体在填料层内的分布和壁流程度也不同,传质(吸收、精馏)的结果自然也不相同。某些优质填料以其良好的液体均布性能缩小了这种放大效应就是一个实例。

数学模型法是现代化工过程进行定量描述的一个重要方法,许多严谨的数学模型的建立少不了对流场的了解,即必须以流体在流场中的速度分布和压强分布为基础。

由此可见,理解各种流动现象,对掌握化工过程的进行和设备的性能至关重要。如果不了解管流、绕流、尾流、射流、二次流等各种流动现象的基本规律,不了解滴、泡、膜的流体力学行为,就很难真正理解化工设备中所发生的过程。从现行国内的各种版本的化工原理教材来看,“流体流动”一章尚不能满足今后工作和理解化工过程的需要。因此,对某些专业的学生学习一点结合化工特点的化工流体力学^[1]将是十分有益的。

1.2 流体宏观流动与固体运动规律的比较

“概述”是一章的先导,可以从中了解本章的研究内容和基本方法。

“流体流动”一章属基础理论,应对其中的内在逻辑和严格的科学体系作全面的理解。同时,还应从应用的角度了解实际问题的处理方法以及某些重要的工程观点。

流动的基础理论包括两个方面:一是流动的宏观规律;另一是流动的内部结构。对流动宏观规律的理解可以采用与固体质点力学相仿的形式展开,即对下列内容进行比较:

受力分析;

运动描述(速度、加速度);

力与运动的关系(牛顿定律);

功和能(力的作用结果,守恒原理)。

之所以采用这样的处理,是基于流体力学与固体质点力学同属力学现象的统一性,亦即其共同性;同时,与统一性相对应,又便于体现流体力学与固体质点力学的差异,也就是流体力学的特殊性。从知识的发展来说,它比较完善地体现了承前启后的作用;从开发智力角度说,它有

助于用已有的认识(对固体质点力学的认识)去研究新的领域(流体力学领域)的训练,强调流体力学与质点力学的差异,并从新领域的特殊性中领悟与树立新的观点和概念,体察科学的继承和发展的关系。

1. 考察方法的转变

流体流动与固体质点运动相比,由于研究对象发生了变化,从而导致考察方法上的许多不同。

流体力学研究的不再是单个固体质点,而是众多流体微团同时发生的运动。由此造成流体运动描述方法的复杂性。

幸而,发生在化工设备中的流动绝大多数是连续、定态^①的流动,因而可采用欧拉法、即流场的方法对运动进行描述。此时,速度、加速度等运动参数转化为空间点的属性。这样,研究与考察的对象不再是某个微团的行为随时间变化的经历,而成为整个流场。实践证明,并非多数初学者都能自觉地意识到考察方法的这一转变,由此而导致许多认识上的模糊和混乱。不少人起初似乎已经接受了这一考察方法,但在复习与思考问题时往往仍沿用考察固体质点运动的拉格朗日法。为此,应在化工原理课程教学的全过程中,进行预先的安排,在多次涉及这类问题的不同章节内容中,反复阐明这种考察方法的转变。

控制体(Control Volume)与系统(System)的区别也在于考察方法的不同。如果将所考察的对象由一个质点扩大到一定的物质质量,并跟踪这些物质进行考察,这些物质构成一个物系或称为系统,无论所研究的系统是宏观静止或运动的,系统内、外不发生物质的交换。对系统进行考察的方法就是拉格朗日法,也是学习物理、物理化学时较为熟悉的方法;若划定固定的空间范围考察问题,该范围称为控制体。物质连续地流入和流出控制体。取控制体作考察的方法就是欧拉法,这是本门课程中常用的考察方法。

2. 研究内容的差异

流体微团运动与固体质点运动的另一个重要差异是受力的种类,其中以内摩擦力显著不同于外摩擦力这一点尤应注意。流体的内摩擦力遵循着特有的规律。

牛顿流体的内摩擦力(剪应力)服从牛顿粘性定律,对一维层流流动而言是:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (1.1)$$

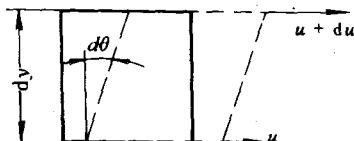


图 1.1 变形率

该式的物理模型及粘度的定义早已在物理学中作了说明。这里要问,固体的内应力与变形成正比,何以流体的剪应力却与“速度梯度”成正比?流体在剪切力的作用下其变形是无止境的,只要作用力存在,变形和运动将一直持续下去,只能在应力与变形的快慢(即变形速率)之间建立关系。而这里的速度梯度就是剪切变形的速率。

参见图 1.1,在流动流体中取一流体微元,如图中实线所示。经 dt 时间后发生剪切变形,如图中虚线所示,角变形 $d\theta$ 为

$$d\theta = \frac{du \cdot dt}{dy}$$

单位时间的变形是:

① 详见本章第 6 节的说明。

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$$

可见 du/dy 是一维流动中因剪切而造成的角变形速率。

牛顿粘性定律还说明内摩擦力的大小与正压力无关,内摩擦的能量耗散不是流体与管壁相对滑动造成的结果。这些都是与外摩擦力不同之处。

1.3 流体静力学的两个主要结论

压强和静力学的基本内容早在物理课中已经学过。本课程理应着重于静力学的研究方法和主要结论,以及将这些结论用之于工程实际。

静力学方程有多种推导方法,但其基本的研究方法是取微元流体作力分析,列出力平衡方程。本章将多次使用这一方法。

对不可压缩流体,静力学的主要结论有两点:

$$p + \rho gz = \text{Const} \quad (1.2)$$

或

$$\frac{\mathcal{P}}{\rho} \equiv \frac{p}{\rho} + gz = \text{Const} \quad (1.3)$$

式(1.2)表示静止流体中压强的分布规律,式(1.3)表示势能(静压能与位能之和)分布规律,这两个结论具有同样重要的使用价值。

虚拟压强 $\mathcal{P}$ 定义为:

$$\mathcal{P} \equiv p + \rho gz \quad (1.4)$$

其物理意义是单位体积流体所具有的总势能,即静压能与位能之和。

虚拟压强 $\mathcal{P}$ 与真实压强 p 的主要区别是它与流体的密度有关。说明一点的虚拟压强 $\mathcal{P}$ 的数值还应指明是什么流体。虚拟压强的引用使许多流体力学问题的表述更为简明和严格,现已为国内外不少教材所采用。详细的讨论参见 1.11 节。

静力学中值得注意的一个问题是对浮力的理解。在物理学中已知浮力等于物体排开同体积流体的重量,这里则要强化形成浮力的本质,是作用于物体各部的压强不同而导致的结果。对悬浮于流体中的物体作受力分析时,考虑了压强力就不应该再计浮力。这一点并非学了静力学后都能自然明瞭(参见 1.11 节中转子受力的平衡条件)。

1.4 机械能守恒

流动流体的守恒原理其最终形式都是就控制体而言的,它是描述质量、机械能、动量(以及动量矩)在流入与流出控制体外围表面上的变化规律。从方法论角度看,其目的是将两个空间位置上的运动参数联系起来,而避免涉及对中间过程的考察。

描述机械能守恒的伯努利方程可用热力学或经典的流体力学等多种方法导出。本课程采用什么推导方法主要取决于教学目的。这里建议采用下列推导步骤:

(1)用拉格朗日考察法导出单个流体质点在无摩擦的理想条件下沿轨线运动的机械能守恒式:

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g + \frac{u_2^2}{2} \quad (1.5)$$

此式可从牛顿第二定律出发,经严格的数学处理导得。与固体质点运动的守恒定律相比较,多一项压强能;与静力学相比较,多一项动能。不难理解,式(1.5)的结论应在预料之中。

(2)引入定态流动条件,式(1.5)形式不变而成为沿流线的机械能守恒式。只是下标 1、2 不

再表示一个流体质点在不同时间的两个状态,而是表示同一时间、一条流线上的两个不同的座标点。

(3)引入均匀流条件,从而同一截面上各点的势能($p/\rho + zg$)相等,式(1.5)由沿流线推广成为理想流体沿管道流动的机械能守恒式。

(4)引入动能校正因子,以平均流速代替速度分布来表达单位质量流体的动能。即以 $\alpha \bar{u}^2/2$ 代替 $\bar{u}^2/2$,式中 α 称为动能校正因子。

(5)引入实际流体的能量耗散,即在式(1.5)右方补入 h_f 一项。

在上述各步修正中,定态流动与均匀流动是应用伯努利方程的条件;引入动能校正因子与 h_f 只是一种形式上的处理,其目的是为了便于应用。这两项必须另行确定。

上述方法引出伯努利方程有如下两个优点。

其一,在与固体运动比较的基础上,在沿用固体质点运动规律的同时,引入一些流体力学知识,包括考察方法的转变。而且沿流线的伯努利方程可以解释毕托管、堰流量计的原理,这是热力学总体衡算法所不能替代的。

其二,将整个管道内(范围)粘性流体(对象)的复杂问题处理为从理想流体、单个质点的运动出发,然后将所得的方程逐步修正,使之便于实际应用,体现了工程上常用的处理方法。这种推导,不再是纯数学的处理,而着重于工程观点和工程方法的阐明。从单纯的知识传授转变为兼顾能力的培养,就要挖掘事物的内在规律性,而不满足于数学演绎和结论本身。

在获得机械能衡算之后,要着重解决应用问题。要从典型实例中掌握伯努利方程使用的要点,尤其是截面的选取。在实际应用中显示理论的威力,引起学习的兴趣。

1.5 动量守恒

1. 为什么要掌握动量守恒定律

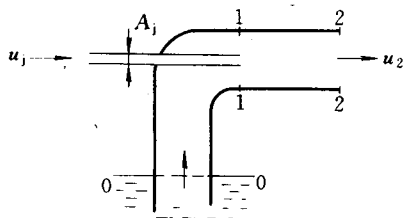


图 1.2 喷射泵

首先考察图 1.2 所示的喷射泵。水从喷嘴以高速 u_1 流出,在截面 1 造成低压,将水槽中的水从水位 0 吸上并压至截面 2。

若截面 0、2 均为大气压,显然单位质量的流体在截面 2 处的机械能明显高于截面 0。由截面 0 至截面 2 不能列机械能衡算式。这是由于机械能守恒式说的是单位质量流体的能量守恒,一股流体与另一股流体之间不发生机械能交换。所以伯努利方程

原则上不适用于分流(分支管路)或合流(汇合管路或图 1.2 所示的情况)。而机械能衡算式虽引入了机械能损失 h_f 一项,但只有 h_f 项可以预估或可以忽略时才有意义。在本例情况下,由于喷嘴中的流体与被吸入流体两者在混合处有显著的能量交换,同时还伴有不可忽略和难以估计的能量损失。所以无法使用机械能衡算式。

此外,在弯管受力和其它流体动力机械的力分析中,也不能用能量的观点解释,因为能量衡算式推导的本意就是为了消去力这一项。而许多受力问题及局部流动问题往往可用动量定律解决。如果在流体流动一章中不讨论动量定律,这有失于力学体系的完整性,缩小了初学者的视野。

2. 考察方法

流体流动中的动量定律是指流入、流出控制体的动量之间的关系。这里应注意它与固体动

量定律之间的区别与联系。

固体的动量定律是：

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{u})}{dt} \quad (1.6)$$

即作用力等于物体动量的变化率。现从这一定律出发考察运动流体。

图 1.3 中有斜线的一段流体 0—2 在经 Δt 时间后流至新的管段 1—3, 将图中有关流体按空间分成 I、II、III 三个区域。经 Δt 时间后, 流体失去了 I 区的动量而增加了 III 区的动量。第 II 区的流体动量为 Δt 时间前、后的流体所共有。由此可利用固体的动量定律式(1.6)得

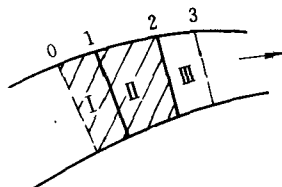


图 1.3 流体动量的变化

$$\vec{F} = \frac{\Delta(m\vec{u})_{\text{I}}}{\Delta t} + \frac{(m\vec{u})_{\text{II}} - (m\vec{u})_{\text{I}}}{\Delta t} \quad (1.7)$$

若取截面 1 至截面 2 之间的范围作为控制体, 式(1.7)的含义为:

作用于流体的力 = 单位时间控制体内动量的增加率 + 单位时间流出控制体的动量 - 单位时间流入控制体的动量

取极限 $\Delta t \rightarrow 0$, 式(1.7)即成为流动流体的动量定律:

$$\vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{u} dv + \int_{A_2} \rho \vec{u} (\rho \vec{u} dA) - \int_{A_1} \rho \vec{u} (\rho \vec{u} dA) \quad (1.8)$$

以上推导反映了固体质点的动量定律(拉格朗日法)向流体动量定律(欧拉法)的转化。对定态流动, 控制体内流体的动量没有变化, 上式右方第一项为零, 式(1.8)可写成 x, y, z 三个方向的分量式:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= W(u_{x,2} - u_{x,1}) \\ F_y &= W(u_{y,2} - u_{y,1}) \\ F_z &= W(u_{z,2} - u_{z,1}) \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

式中 W 为质量流率, 下标 2、1 分别表示截面 2 和截面 1。

3. 动量定律与机械能衡算式的关系

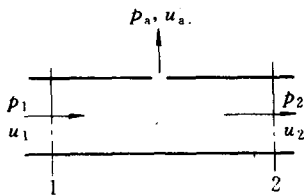


图 1.4 分配节

流体的伯努利方程和动量定律都出于牛顿第二定律, 只是分别以能量和动量的形式表示。将它们用于同一个问题的理论解析, 理应得到相同的结果。但是, 某些局部流动问题使用这两个方程所得结果并不一致。图 1.4 所示的流体分配节就是一例。

将式(1.9)的动量定律用于此分配节, x 方向作用于流体的力 $(p_2 - p_1)A$ 应等于动量的增加 $W\rho(u_2 - u_1)$, 则得:

$$p_2 - p_1 = \rho(u_1^2 - u_2^2) \quad (1.10)$$

若从截面 1~截面 2 列伯努利方程则得:

$$p_2 - p_1 = \rho(u_1^2 - u_2^2)/2 \quad (1.11)$$

不同的结论并不意味着理论上的矛盾, 而在于上述分析中各自作了不同的简化假设。在动量法中, 式(1.10)的获得是在作用力一项中忽略了管壁对流体的作用力, 且假定小孔流出的流体不具有水平方向的分速度和动量。而在列伯努利方程而得式(1.11)时, 则忽略了分流时两股流