第一章　化学工业与化学工程

化学工业是以天然物质或其他物质为原材料，利用这些物质的性质或形态变化，或以这些物质组合，加工成对国计民生有价值的化学产品的一种工业。在这种工业中，以化学反应过程为核心。化学专业学生在学习了无机化学、有机化学、物理化学等课程以后，进一步学习生产和加工化学产品的应用技术知识，则必须了解化学工业生产基本知识，以及化学工程学科的基础理论和技术对化学工业发展所起的重要促进作用。

第一节　化学工业概述

一、化学工业的重要性及其发展

化学工业是国民经济重要的基础工业，是工业经济中最具活力，有待开发且竞争力极强的一个部门。其特点是产品品种多、服务面广、配套性强。其重要性可以大致归纳为如下几个方面：

（1）为农业提供化肥、农药、塑料薄膜等农用生产资料；

（2）为轻纺、建材、冶金、国防、军工及其他工业提供各种配套原材料；

（3）为微电子、信息、生物工程、航天技术等为代表的高技术产业提供新型化工材料和新产品；

（4）为人们的衣、食、住、行提供各种化工产品。

化学工业和其他工业有着广泛的联系，它既对外提供化工产品或原料，又从其他工业和化学工业本身获得原料或中间体。因此，化学工业的发展对相关产业的供需稳定有很大的影响，它们之间相互依存、相互促进的关系特别明显。

当前，化学工业在世界范围内正发生日新月异的变化，其发展的速度和规模都相当大，且产品已渗入国民经济的各个领域。就我国化学工业而言，已经发展成为具有化学肥料、塑料、合成纤维、合成橡胶、酸、碱、染料、油漆、农药和无机盐类等行业比较完整的化学工业体系。许多化工产品增长速度非常迅速，如化肥、农药、塑料、纯碱等。

二、化学工业的分类及其特点

化学产品的原材料及供应市场所涉及的范围是相当广泛的，很难对化学工业作出简单明确的分类。按照美国标准工业分类手册（standard industrial classification，SIC）确定的分类法，化学及有关产业的工业是较大的一类。它包括生产基本化工产品的企业和以化学方法为主进行产品加工的企业。它们一般生产三类产品：基本化工产品；进一步加工用产品以及供最终消费的化工产品。而在我国，目前大致分为：基本化学工业、化肥工业、石油化学工业和其他化学工业。主要化工行业及其产品如表 1-1 所示。

与化工行业相关的部门包括：石油化工、塑料制品、化学纤维、无机盐、炼焦化学、日用化工、皮革化工业以及医药等。

随着社会生产力和人们生活水平的不断提高，化工新技术开发的进度不断加快，化工产品的结构日趋合理，产品质量也在不断提高，已适应和满足了不同消费的需求。其中许多精细化工产品的生产已越来越受到重视。伴随该类产品产值在化学工业产值中的比重逐年上升

表 1-1 主要化工行业及其相关产品

化工行业	主要产品或用途
化学矿山	磷矿、硫矿、硼矿、矾矿和石灰石矿等
酸、碱	硫酸、烧碱、纯碱
无机盐	磷酸、碳酸钾、小苏打、无水硫酸钠、氯化钠、硫酸铝、硝酸钠、氯化锌、轻质碳酸钙、过氧化氢、沉淀硫酸钡等
化　肥	氮肥(硫酸铵、硝酸铵、尿素、氯化铵、碳酸氢铵、氨水、石灰氮等)、磷肥(普通过磷酸钙、钙镁磷肥等)、钾肥
化学农药	敌百虫、乐果、甲胺磷、杀虫双、草甘磷、多菌灵等
电　石	可作为生产聚氯乙烯、聚乙烯醇、氯丁橡胶、乙酸、乙醛、乙炔黑、双氰胺、硫脲等工业的原料
热固性塑料和工程塑料	酚醛塑料、氨基塑料、环氧树脂、不饱和聚酯树脂等，聚碳酸酯、聚甲醛、ABS 树脂、尼龙 1010、尼龙 6、尼龙 66、聚砜等
合成橡胶	顺丁橡胶、丁苯橡胶、氯丁橡胶、丁腈橡胶等
染　料	硫化染料、直接染料、酸性染料、活性染料、碱性染料、还原染料、分散染料、冰染染料、阳离子染料等
涂　料	天然树脂漆、酚醛树脂漆、醇酸树脂漆、氨基树脂漆、过氯乙烯漆、聚酯漆、聚氨酯漆、硝基漆、有机硅漆等
增塑剂	邻苯二甲酸酯、对苯二甲酸二辛酯、己二酸二辛酯、烷基磺酸苯酯、氯化石蜡、磷酸酯等
橡胶加工助剂	防老剂、促进剂
工业表面活性剂	阳离子型、阴离子型、非离子型、两性型等
造纸化学品	脱墨剂、助留剂、助滤剂、表面处理剂、浆内施胶剂、纸张增强剂、涂布胶粘剂、分散剂等
感光材料	电影胶片、照相胶片、特种胶片、彩色像纸等
磁性记录材料	磁带、磁盘等
橡胶加工	轮胎、运输带、胶管、胶鞋、炭黑等

已经出现了把生产精细化工产品的工业作为一个单独部门从化学工业中划分出来的倾向。依据精细化工产品的功能和结构特征，其大致可分类如下：

①医药和兽药；②农药；③粘合剂；④涂料；⑤染料和颜料；⑥表面活性剂和合成洗涤剂；⑦塑料、合成纤维和橡胶用助剂；⑧香料；⑨感光材料；⑩试剂和高纯物；⑪食品和饲料添加剂；⑫石油用化学品；⑬造纸用化学品；⑭功能高分子材料；⑮化妆品；⑯催化剂；⑰生化酶；⑱无机精细化学品。

从上述如此繁多门类的化学工业在国内外发展状况来看，化学工业有如下特点：

(1) 增长速度快；

(2) 化工科研和新产品开发费用高；

(3) 化工产品、工艺路线、技术创造性上竞争激烈；

(4) 大规模连续化生产和技术的复杂性促使化学工业投资加大；

(5) 新工艺的投入、生产规模的扩大以及设备的腐蚀，致使化学工业的工厂寿命缩短、报废快；

(6) 在资金足够的条件下，化工产品进入市场的自由度大；

(7) 市场需求在产品过剩与短缺之间循环变化；

(8) 运输便利、均相及价值高的化工产品贸易有国际性；

(9) 化学工业与整个工业相辅相存，在经济发展中起着支柱作用。

三、化工产品的市场及其前景

对化工产品的需求依赖于产品用途的开拓和市场消费的程度。其中，化学工业本身就是化工产品的最大消费市场，因为在对化工产品的深加工过程中，它需要依赖本工业生产的约一半的初级产品。从这种意义上来说，化学工业发展容易受其相关产业左右，如：合成纤维、塑料、农药、合成洗涤剂、包装材料和建筑材料等。正因如此，对于化工产品市场的调查和预测也就显得非常重要。因为市场需求是化工企业生产发展和经营开拓的依据，是企业赖以生存的前提条件。通过市场调查和预测了解和认识市场对产品的需求，分析和研究产品生产的生命周期；以此制定新产品开发、改造或淘汰老产品的规划；确定产品在其生命周期中各阶段的市场策略；制定产品生产销售计划；以保持企业在市场竞争中的优势。只有在产品营销过程中不断进行调查，掌握市场动向和发展趋势，及时反馈信息、储存信息，企业才能获得长足的进步和发展。

值得注意的是，化学工业中有些应用领域已经在数量和质量方面达到饱和，在这些领域内今后不可能会有很大发展，因此，发展化学工业的关键，应为满足人们现有需要的同时，开拓新用途并开发与新的需要相适应的产品。近年来，我国已经十分重视精细化工产品的开发和应用，如染料、涂料、表面活性剂、粘合剂、增塑剂、农药、医药、功能高分子材料和油品添加剂等行业都进行了深入的研究。预计在今后几年里，我国精细化工产品将会高速增长。表 1-2 显示了 1996 年我国精细化工的生产现状。

表 1-2　我国精细化工生产现状

门　类	企业数/个	生产能力 万吨/年	品种/个	产值 亿元/年
饲料添加剂	1000	25	177	40
食品添加剂	400	100	1200	70
表面活性剂	544	59	1028	84
水处理化学品	100	12	100	5
造纸化学品	80	10	400	2
皮革化学品	150	7	200	3
油田化学品	130	103	1000	19
胶粘剂	650	256	2800	60
生物化工	300	270	532	200
电子化学品	100	1	1000	3
纤维素衍生物	60	6	50	4
丙烯酸及其酯	3	19.8	23	15
聚丙烯酰胺	60	6.5	60	6
气雾剂	300	0.8	700	100
合　计	3877	876.1	9270	611

展望 21 世纪，化学工业将会由传统工业过渡到以新材料、精细化学品和专用化学品、生物技术为主体的技术密集型产业。正如有人所说，精细化、个性化、绿色化——知识经济时代化学工业、化学工艺及化学工程的大趋势。

第二节　化学工程的发展趋势

化学工程作为一门工程技术学科，迄今已有 80 多年历史了。它以物理学、化学和数学为基础，并结合工业经济基本法则，主要研究化学工业中的物理变化和化学变化过程及其有关机理和设备的共性规律，并把这些规律应用到化工装置的开发、设计、操作、控制、管理、强化以及自动化等过程中，在化工工艺与化工设备之间起着承上启下的桥梁和纽带作用。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

一、化学工程的兴起与发展

化学工程是随着大规模化学工业的发展而形成和发展起来的。早在 1887 年，戴维斯（Davis，G. E.）在英国曼彻斯特工学院作了一系列化学工程问题的讲演，但由于当时还缺乏数据和对过程开发的全面认识，戴维斯并未能对化工操作作出定量的处理。1888 年美国麻省理工学院以诺顿（Norton，L. M.）为首，设置了关于应用化学工程教育问题研究委员会，并于同年 12月作出设置化学工程课程的决定，世界上第一次讲授“化学工程”这门课程。1915 年利特尔（Little，A. D.）提出了“单元操作”（unit operation）的概念，沃尔克（Walker，W. H.）则通过“单元操作”重新组织了麻省理工学院化学工程的讲授，并进一步改造了化学工程的指导方针和实验室建设。“单元操作”这个概念至今仍是化学工程之表征。1923年，麻省理工学院的沃尔克、刘易斯（Lewis，W. K.）和麦克亚当斯（McAdams，W. H.）合著了化学工程第一本教科书——《化工原理》（Principles of Chemical Engineering），书中包括了流体流动、过滤、传热、蒸发、蒸馏、干燥、粉碎等单元操作，并对它们从理论上作了很好的总结和阐述，形成了一个体系。即以单元操作为中心，紧密结合应用化学，并明确指出在化学工程教学中不应忽视的化学与物理化学的作用。

20世纪 40年代以来，以合成纤维、合成橡胶、合成塑料三大合成材料为代表的石油化工的迅速发展，促使化学工程从经验向科学演变。经过对各种单元操作分析、综合，发现所有的单元操作均有着共同的基本规律，亦即动量、热量和质量传递等三种传递过程是化学工程的本质问题。

自20 世纪 50 年代起，高速电子计算机的应用，解决了过去人们不能解决的复杂工程计算问题。这也就有了把化学反应规律与生产规模装置中的传递过程规律综合起来进行分析和处理的可能。于是，1957 年在荷兰阿姆斯特丹举行的第一次欧洲化学反应工程会议上，正式提出了“化学反应工程”（Chemical reaction engineering）的概念。至此，“三传一反”（mass transfer，heat transfer，momentum transfer and reaction engineering）就形成了化学工程的主要内容。这一时期内，原子能工业的诞生，环境科学被提到重要位置，气体扩散、气体离心分离、热扩散、超滤、反渗透、泡沫分离等技术相继问世，进一步促进了化学工程的发展。

20世纪 60年代后期，随着传递过程原理和化学反应工程的开拓，计算机用于化学工程以解决过程的最优规划、最优设计、最优控制及最优操作，又促成了“化工系统工程”的诞生，为化学工程的决策及方法论提供了有力的依据。

20世细 70年代以来，随着电子计算机的进一步发展，同时由于化学工程基础理论的成熟和数学模型化方法的普遍应用，化工系统工程又有了较大发展。目前，这门学科在化工过程的开发、设计，现有工厂技术改造方面发挥着越来越大的作用，取得了良好的效果。

1983 年在美国化学工程师学会（AIChE）第 75周年年会上，人们把化学工程定义为“经济地开发利用物质和能量的方法为人类造福的工学”，从而展现了化学工程及其广阔的领域和应用前景。

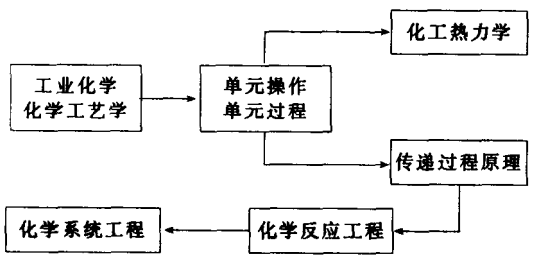

图 1-1 化学工程理论发展过程示意图

综上所述，学科要继续保持旺盛的活力，求得更大的发展，只有不断地适应社会层出不穷的新需要，不断加强自身的理论建设。图 1-1 示意化学工程的发展过程，从中可以看出它已经建立起了一套完整的理论体系。

二、化学工程的前沿研究领域

从 80 年代开始，科学技术发展速度惊人。一场以高技术为中心的新技术革命正蓬勃发展起来。许多工业发达国家都以信息技术为先导、以新材料技术为基础、以新能源技术为支柱，沿微观尺度向生物技术开拓，沿宏观尺度向空间和海洋扩展。他们以这六大高技术领域为其发展战略，从而导致了许多学科发生了巨大的变化。这场新技术革命无疑为化学工程提供了新的发展机会，其范围已经不局限于传统的化工领域。化学工程已经面临处理更多边缘目标，将成为更为通用和广泛范围的学科。

1. 材料工程

随着高技术的发展，迫切需要开发具有高强度特殊性能的新型材料。在新材料领域，研究高聚物、陶瓷材料、复合材料等微结构材料的分子结构与性质之间的关系；研究原料选用及材料加工与所生成的微结构之间的关系；研究材料表面及界面上的物理化学现象；用化学方法而非机械方法制造部分复杂材料等，都需要进行化学工程方面的研究。而研制得到的新材料应力求达到：结构与功能相结合，具有智能，环境污染小，可回收再生，且能耗要低。

2. 能源化工

化学工业是一个高能耗工业，它利用各种形式的能量来合成和生产人们所需要的各种化工产品，因此，开发新能源，充分利用现有能源，回收化工生产过程排放的废热，这就形成了化学工程与能源技术相结合的新的研究领域——“能源化工”,在该领域中,煤炭资源的开发利用很值得研究。由于煤的结构特征是氢碳比较低，故欲使煤转化为气体或液体产品，必须采用加氢转化工艺。在煤的气化方面，目前世界上已经工业化或即将工业化的方法有：固定床、流化床、熔融热载体和等离子气体等。

煤的直接液化有溶剂热解抽提、溶剂加氢抽提、高压催化加氢、干馏液化、H_2O-CO 液化、无溶剂液化、地下液化以及生物酶对煤的催化转化等；掌握由合成气（H_2、CO）直接制取基础有机化学品，如醋酸、乙二醇、烯烃等新技术；开发石油炼制新原料；研究核能、氢能、太阳能、地热能、生物能及城市废物能源；研究各种高效节能新技术，如热泵、热管、高效强化传热表面等，仍是化学工程界 90 年代乃至下个世纪研究的热点。

3. 环境化工

与当代社会发展相伴的环境问题。化学工业是造成环境污染的“根源”之一。如何控制污染并使之减小到最低程度，保护环境，以“创造一个干净安全的世界”，则是化学、化工工作者义不容辞的责任。

目前，大多数工厂需要消耗大量燃料，并使之转化为热能、电能或机械能，然而人们利用的只是燃料的能量，而没有利用其中的物质——以 CO_2 的形式排放于大气之中，造成大气中 CO_2浓度激增，产生全球性温室效应，影响生态平衡。从保护环境与碳源出发，诞生了一门新兴学科，即“二氧化碳化学”，专门研究处理和利用 CO_2，设法大规模人工固碳，以使不断消失的有机碳源回归生态环境系统中来。实验表明，用 CO_2 可以合成出目前利用石油为原料的各种产品。

此外，在全球范围内禁止使用氟氯烃，并开发其替代物以保护臭氧层。

伴随高速发展的工业生产，“三废”——废水、废气、废渣等问题也严重地威胁着人类的生存。如果不及时处理，将给子孙后代造成严重的隐患，所以，根治“三废”、“变废为宝”已是刻不容缓的任务。这项工作与化学工业有直接联系，且大部分工作将应用到化学工程的基本原理，使用的设备大致也和化学工业相同，故基本上属于化学工程的范畴。然而，应当引

起重视的是“三废”往往也是冶金、电力、核工业等部门所共有的问题，交叉关系比较复杂，有时还需应用生物学原理。加之噪音以及机动车辆、轮船、飞机等所产生的“三废”治理，因此，一门与化学工程密切相关的新兴工程学科——“环境工程”也就应运而生了。

4. 生物工程

目前在许多国家的发展战略中，在高技术竞争方面都把发展生物技术放到特别重要的地位。甚至有人说：20 世纪是近代物理学和化学的世纪，那么可以预言， 21 世纪将是现代生物技术的世纪。

化学工程与生物技术的结合已经形成了化学工程的新方向——“生物化工”,其技术实质是以具有生物活性的酶为催化剂替代传统化学工业使用的一般催化剂。由于酶催化反应具有反应条件温和、能耗低、效率高、选择性强、三废少、可利用再生资源及能合成复杂有机化合物等优点，故生物化工正成为化工领域战略转移的目标。

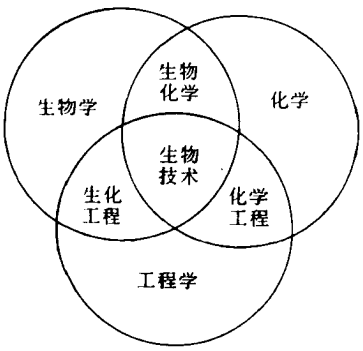

图 1-2 生物技术与各学科的关系

为了更好地说明生物技术（生物工程）的综合性，可用图 1-2 表示生物技术和几个基础学科的关系。生物工程在化工生产上的应用主要借助酶和微生物合成有机化合物（遗传工程用于医药方面，发酵工程用于医药及传统农林化学品）或处理工业废水。生物方法制成的化学品范围极广，它不仅能生产化学结构简单的小分子化合物（如：柠檬酸、乳酸、抗环血酸、氨基酸、丙烯酰胺及生物色素等），而且还能制造出用传统方法极难合成的复杂结构的化合物（如：酶制剂、微生物多糖、聚 β羟基丁酸酯及生物农药等）。

除以上所述的几点之外，像化工系统工程、临界或超临界条件下的化学工程也都属于化学工程研究的范畴。

随着高新技术革命向深度和广度进展，信息、知识的“爆炸”与更新，各种新兴科学如：可靠性技术、管理科学技术、新能源技术等进入化工领域，且相互渗透与结合，已产生了一些更新的边缘技术学科，例如：医学化学工程、电化学工程、地热化学工程、表面界面工程等等。预计为更好地适应高技术的发展，化学工程还将向更广的领域延伸。这不仅会推动化工产业日趋高技术化，而且对化学化工高等教育的发展与改革亦将产生重大影响。许多化工高技术专业与学科的建立，高校教学内容的更新，化学化工人才的知识结构必将转向“智能型”的轨道，以更好地适应 21 世纪科学技术发展和竞争的需要。

第三节　化工过程与单元操作

一、化工过程简介

所谓化工过程，是指将原料进行若干化学和物理过程加工、处理，生产出预期产品或中间产品，并获得一定附加值的生产过程。虽然化学工业门类繁多，产品各异，但是任何化工过程都可以用图 1-3 所示加以概括。

（1）原料在反应前经过若干工序的预处理，其主要由机械加工、净制提纯和加热、冷却等过程组成，使原料达到符合化学反应所要求的工艺条件。

（2）进行化学反应，伴随着热量的释放和吸收过程。

（3）反应后的产物经过均相或非均相分离，以及过滤、筛析、干燥等若干工序的后处理，最终获得产品

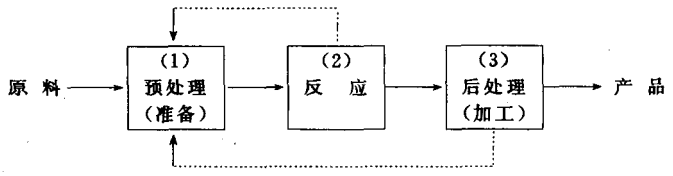

图 1-3 基本化工生产过程

化工生产过程的核心是化学反应，并且要涉及到特定的化学反应器。上述生产过程除了化学反应外，大多数是物理过程，它又可以分为各种基本过程，通常称为化工单元操作。因此，化工生产过程又可认为是由化学反应过程和化工单元操作所组成。

二、化工单元操作

1915 年，美国的利特尔首先提出了单元操作的概念，并认为任何化工生产过程无论规模如何，都可以分成一系列基本操作，例如，流体流动、加热、混合、冷却、分离等。单元操作就是使物料发生所要求的物理变化的这些基本操作的总称。只有将种类繁多的化工过程分解为单元操作来加以研究，才能揭示其共性规律。

根据单元操作所依据的理论，可以将它们归纳为以下三类过程：

(1) 流体流动过程——流体输送、搅拌、沉降、过滤、离心分离、固体流态化等。

(2) 热量传递过程——传导、对流和辐射传热、热交换（加热、冷却、冷凝）、蒸发等。

(3) 质量传递过程——吸收、蒸馏、吸附、萃取、结晶、干燥、膜分离等。

流体在流动时，由于内部产生动量传递，故流体的流动过程也称之为“动量传递过程”。

对于有关单元操作的研究，都可以对应于一种或几种传递过程综合。

在对化工过程的研究中，由于实际生产过程复杂，涉及的变量较多，致使大多数化工单元操作不可能像物理学那样建立反映实际过程的简单的数学方程式。多数情况下只能采用实验研究方法，通过实验数据制成经验曲线图，或整理得到经验方程式。近代所采用的数学模型法，虽将过程经过一定理论分析，获得一些反映过程规律的数学方程，但仍须通过实验验证后方能使用。用理论分析和科学实验相结合得到的描述过程规律的数学方程，一般称为半理论、半经验方程式。

本课程的主要任务是介绍化学工程学的基本原理、基本方法和几个常用单元操作的典型设备和基本反应器的原理、结构、选型，以及与操作有关的计算方法；通过对实际过程进行研究，经过综合、归纳、合理简化，提出满足工程要求的近似处理，以培养学生运用基础理论知识分析和解决化工生产过程中一些实际问题的能力。

第四节　化工过程开发简介

一、化工过程开发的基本要求

研究化工新产品、新技术和新工艺，开辟新原料来源，以及对原有产品生产方法和工艺过程改造等，在它们未实现工业化之前，大都是从实验室研究开始，并以实验室研究成果的形式出现的，但是，这种形式只能在原理上说明该成果具有初步的可行性，最终只能完成一种新产品、新技术或新工艺的设想，并不具备用来建立一套生产装置且使之工业化的全部条件。若要把实验室的研究成果转变为生产力，不仅要考虑到产品生产的原料路线和技术路线，还要考虑产品质量及市场销售；副产物的回收及综合利用；能源供应及消耗定额；“三废”治理及环境保护等许多技术经济问题。所以，在获得实验室研究成果以后，必须对该成果作进

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

一步研究和反复论证，深入考察在实验室条件下无法考察的各种工程技术问题（可能属于化学方面或物理方面，或两者兼而有之），并对研究取得的结果反复进行技术经济评价，从技术、经济、生态和生产安全等方面考察技术方案的可行性。只有获得该项目在技术上可靠、经济上可行、生产上安全、对环境不造成危害的结论后，才能建立生产装置并投入工业生产。

化工过程开发就是指从实验室研究过渡到建立第一套生产装置的全过程。

在工业生产反应器选型和确定经济规模的决策过程中，可以清楚地看到化学工程和基础学科间的交叉影响。为了使反应器达到最佳生产水平，不仅要选择合适的工程方法，而且要考虑物理过程和化学过程互相影响的速率。以此为基础，选择或设计出符合化学动力学要求的反应器类型和结构。反应器设计过程如图 1-4 所示。

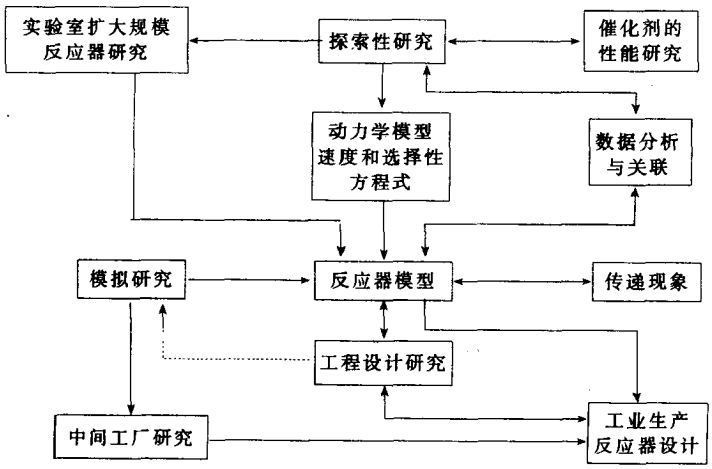

图 1-4 反应器设计过程示意图

欲完成一条最佳开发路线，既不能直接依赖理论分析，也不能单纯依赖于经验，而应是理论分析和实践经验相结合，才能获得实验室成果开发放大的可靠信息。

二、化学实验与化工生产过程的联系与区别

化学实验可用以让人们确认过去所获得的化学知识或者探求新知。通过化学实验研究所得到的成果只有最终推向工业生产、变为现实的生产力才能造福于人类。然而，实践证明，实验室成果与化学工业生产过程尽管化学反应一致，但是却不能直接将实验室成果直接应用于大规模的化工生产过程，因为两者之间有着许多不同之处。仅以反应装置的体积为例，某沸腾床反应器在实验室用体积为 $V_1=\frac{\pi}{4}d^2l$，现若扩大反应，将反应器直径和长度均扩大 10 倍，则反应器体积 $V_2=\frac{\pi}{4}(10d)^2(10l)=1000(\frac{\pi}{4}d^2l)$，即放大后的反应器体积比实验室反应器体积增大 1000 倍，而反应器表面积仅仅扩大 100倍，即：$A_2/A_1=\pi(10d)(10l)/\pi dl=100$，因此，化学反应过程中必然会造成放热量与散热量的不均。若不采用其他措施，放大后的反应结果必然会与实验室反应结果不同。此外，像物料用量、反应条件控制、设备材质等等，二者之间也均存在很大差异，表 1-3 列出它们之间的简单比较。

通过上述简单比较可以看出，化学实验与化工生产过程之间存在着较大差异，化工生产过程既不是化学实验的简单再现，也不是化学反应的直接放大。因此，为了使实验室研究成果能顺利地开发放大，必须了解工业规模化学反应的特点，了解实验室研究与工业化生产之间的联系和差别。

表 1-3 化学实验与化工生产过程比较

项目	化学实验	化工生产
原料	数量少、纯度高、配比严格、易贮存、无需预处理	量大，因来源不同、价格不一、纯度不同，故使用前需预处理
工艺	操作简单、变更容易、可以精密控制反应条件，无物料返回利用问题	操作复杂，不易随意变更，因传热、传质的影响，单元操作控制难度大。物料需循环，易造成杂质积累，中间检测多
设备	以玻璃材质器皿为主，防腐、易清洗、价格低、通用性好	要求设备强度高、耐腐蚀。为满足"三传"需要，设备结构复杂，清洗、操作较难，设备专用性较强，固定投资大
产品	量少、易采集、通常无需分离、精制、纯度较高	量大、需设专门的分离与精制过程。其分析、包装、贮存、销售等，需设立专门机构
公用工程	简单易行，无需专门设施	需设置供水、供汽、供电、动力、安全、运输等设施
环境保护	废水、废气、废渣排放量较少，且易于处理，无需复杂的专用设施	"三废"排放量大，必须通过专门设施预以治理，因此，相应的综合利用设备、管理、机构及制度必须建立、健全

三、化工过程开发步骤

就化工过程开发而言，针对过程开发所进行的实验室研究，不仅要考虑化学反应的特征以及影响反应过程的诸多因素，而且还要考虑生产过程各个工艺步骤的组合与优化。特别是当该研究进入按照工艺流程而建立小型工业模拟试验时，其考察的内容和范围相当广泛，既要探索工程因素对于过程的影响，查找产生放大效应的原因，又要定量测取各种技术经济指标以作为放大设计的依据。

许多事例说明，如果把化学工程学的基本观点和方法在化工过程开发的实验室研究阶段就引入研究工作中，对于加速技术开发项目的工业化进程极为有利。如图 1-5 所示的连续氯化法制氯化钡的实验室模拟工业化流程，虽然和生产工艺装置在规模和操作条件方面有很大差距，但是，工艺方法和工艺步骤相同。从模拟研究中可以获得许多工艺方面、甚至工程的重要信息。

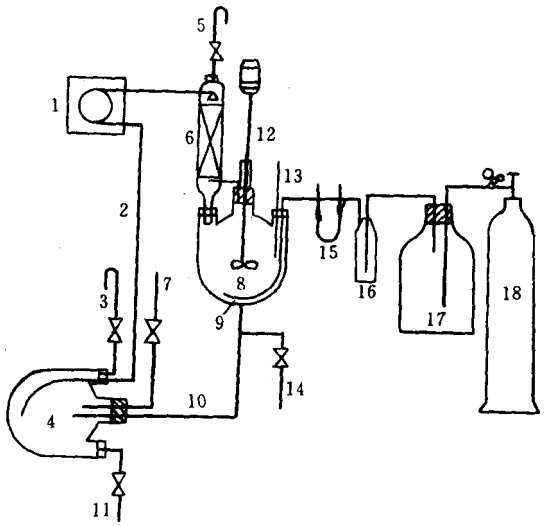

图 1-5 连续氯化反应实验装置

1—胶管计量泵；2—循环管路；3—放空管；4—循环池；5—尾气放空管；6—吸收管；7—Bas 进料管；8—CSTR；9—气体分布器；10—循环管路；11—副产物料浆出口；12—电动搅拌器；13—温度计；14—氯化钡液出料口；15—毛细管流量计，16—洗气瓶；17—缓冲瓶；18—氯气钢瓶

从实验室研究到工业生产的开发过程，往往被人们单纯地理解成参加反应的物料和产品数量的扩大，而忽略了量变带来的质变。其实，每一步放大都伴随着技术质量上的差别。在大型设备上采取的技术措施，不可能和实验过程完全相符。要想使放大前后获得相同的结果，必需掌握过程进行的规律，对一些操作参数作适当的调整，因此，放大技术是以深刻的科学理论和实践经验为基础的，是质和量结合的工程学科。

一般来说，由实验室研究到实现工业化的开发过程，应把实验取得的技术数据和技术理论联系起来进行分析，从中提出工业化初步方案，这是化工过程开发中实验室研究的目的。

化工过程开发步骤及其相应的研究内容如图 1-6 所示。

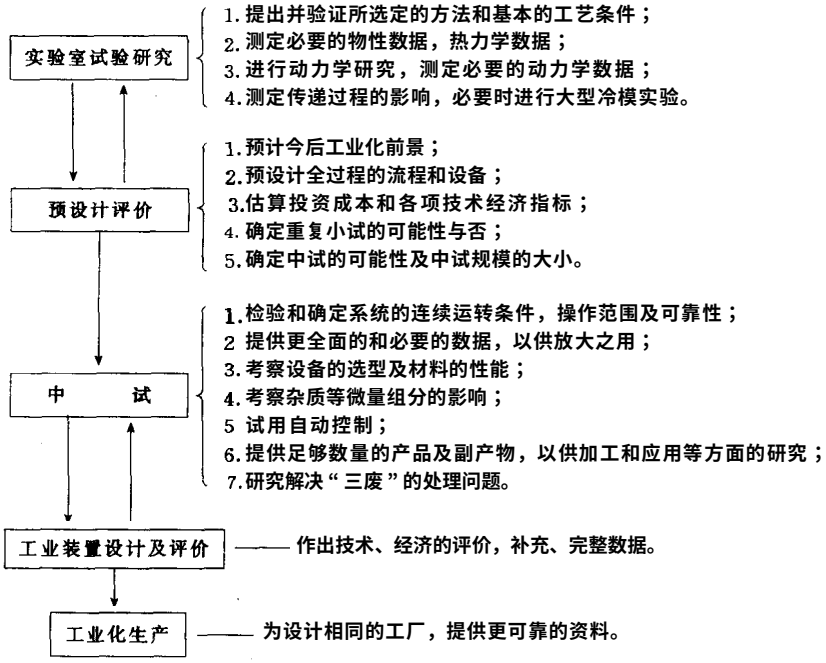

图 1-6　化工过程开发步骤

成功地建设一座化工生产厂，必须达到社会、经济、技术、生态环境和时间等方面要求的一些目标。由于它涉及的问题十分复杂，因此从项目开发的开始，应经过实验室研究→概念设计→技术经济评价→模型试验→中间工厂试验→基础设计→技术经济评价→工程设计等若干步骤。很难设想从构思即可直接进入正式工厂设计。

通常，整个开发工作的实验研究部分可以分为三个阶段，即：探索性研究、过程研究（小试）和开发研究（模拟和中试），但它们之间没有明显的分界，在化工过程开发的整体工作中很难截然划分。

1. 探索性研究

应源于开发计划的构思，是对过程开发的粗略想法；初步建立该项目值得进行开发的概念。要达到这一目的，需要收集一些数据论证设想的可行性。如有关技术经济评价资料，包括某些基本数据，并在对收集的数据进行时效预测和分类整理的基础上，有针对性地探索过程开发的技术路线，因此，这一阶段属于探索性研究。根据研究结果，可以对开发项目的可行性作出最初评价。

2. 过程研究

初步评价如果得出可行的肯定结论，则可以继续开展实验研究。如果是新产品开发，实验室研究侧重于工艺条件实验、催化剂研究，以及考察杂质对过程及产品质量的影响。在此基础上可进一步对研究对象进行模型构想，并提出初级模型。如果过程研究的目的仅仅是为了给大规模的模拟试验打基础，则在实验室条件下亦可进行小规模工艺模拟试验，研究某些过程特征。此时获得的数据不仅可作为模拟放大的依据，而且也是对过程开发进行中间评价的依据。

3. 开发研究

在这一阶段，主要进行模拟试验和中间试验工厂的实验研究。目的是证明整个工艺的合理性和考察工程因素对过程的影响，以及确定技术经济指标。在此必须确定合适的工艺规范。如果采用数模放大，则应证明开发的模型能与实际过程等效，并确定模型参数。至于控制产品质量的参数值，及杂质对过程和产品质量影响的定量关系，也是这一阶段考察的重要内容。通过放大研究取得的一切实验结果，均将用作确定工业生产装置设计和操作的各种参数。

应当注意，建立起生产装置虽然表明化工开发的任务已经结束，然而要把实验室成果转变为生产力却非易事。化工过程开发如同其他新产品、新工艺开发一样，实验室成果转移到生产部门，不可能在工业上获得 100%的成功。联合国亚太地区技术转让中心（RCTT）科技政策顾问瑞特纳姆博士（Dr. Ratnam，C. V. S.）等人曾指出，像美、英、日、法等发达国家获工业化成功的比例大概是 5%～10%，发展中国家如印度这个百分比达到 25%。科技成果向企业转移成功与否的条件和因素如图 1-7 所示，其实质也就是转移过程中所遇到的问题和障碍。

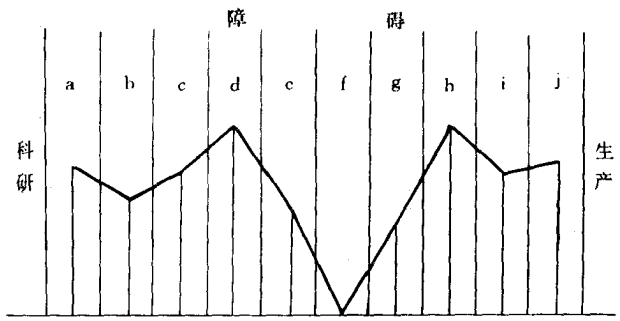

图 1-7 各种障碍比较示意图

a—新颖性；b—现实性；c—研究工作的水平；d—中间试验工厂的性质和能力；e—生产部门转移技术的条件和能力；f—工厂里的设备质量水平；g—投资的水平和投资的规模；h—市场供求情况；i—物质刺激；j—与进口货竞争

四、化工过程开发最优化概念

化学工业的迅速发展推动了化工过程开发工作的现代化。新产品、新技术、新型催化剂和新工艺不断涌现，促进了设计工作的不断更新，也带动了装置大型化和工厂整体化，以及生产系统最优化和控制自动化。

随着化学工程学科研究的不断深入和系统工程方法及计算机技术在化工生产中的广泛应用，化工过程设计的技术水平也在不断提高。因此，化工模拟系统、化工系统最优化、装置最优化等软件的不断开发并渐趋成熟，从而促进了设计工作的标准化和定型化，这些进步均标志着化工设计技术已进入了新的、更高层次的现代化。

所谓最优化就是如何以最小的代价获得最大的效果。效果的大小与被优化系统范围的大小成正比，但随着系统范围的扩大，则优化就会更困难一些。

化工过程开发的最优化必然会涉及到最优实验方案、研究方案的确定；化工过程最优参数的确定；化工系统的可行性分析、技术经济分析和决策最优化等问题。这些优化问题的求解方法，一般是根据有无约束条件而划分为无约束优化问题和有约束优化问题。有约束优化问题又分为两类：线性规划和非线性规划。当目标函数及约束条件都是线性时，称为线性规划；而目标函数及约束条件至少有一个为非线性时，则称为非线性规划。线性规划是应用十分广泛而又成熟的最优化方法，通常采用美国乔治·丹茨格(George Dantzlg) 创立的单纯形

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

法求解线性规划问题。非线性规划问题的优化可归纳为两种：即间接优化法（解析法）和直接优化法（数值法）。前者按照目标函数极值点的条件用数学分析法求解，再按照充分条件或问题的物理意义，间接地确定最优解是极大还是极小；而后者是利用函数在某一局部区域的性质或在一些已知点的数值，确定下一步的计算点，这样一步步搜索、逼近，最后达到最优点。

最优化问题的求解步骤、具体应用，可参阅有关专著，这里不再赘述。

第五节　化工数据

一、化工数据的分类

在化工过程开发研究、工艺计算和工程设计中，不可避免地要涉及到各种数据。其中常用的数据类型大致有以下几类。

(1) 基础数据　在化工工艺设计中，首先应对工艺过程作物料平衡和能量平衡计算。此时必然要涉及到物料本身的物理化学性质及有关状态数据，如：相对密度、比热容、粘度等；同时也必须作平衡常数、焓、熵等大量物性推算工作。这类数据也属于物性数据，通常可从手册上查取或在计算机上从化工物性数据库中检索。

化工物性数据库主要存放纯化合物的物性数据，其中一类是不随温度变化的基本物性常数，例如，相对分子质量、正常凝固点、正常沸点、临界温度、临界压力、临界比体积、临界压缩系数、偏心因子等。另一类物性是温度的函数，常用关联式系数从标准温度下的数值来推算。这类物性数据有焓、熵、比体积、生成热、自由能、蒸发潜热、密度、粘度、热导率等。小型的物性数据库约包括 60～200 种化合物；中型的约　300～800 种化合物；大型的约 1000～5000 种化合物。

(2) 过程参数　这是一类与生产过程进行和操作条件有关的数据，如温度、压力、流速、流量等，称为操作参数。这些参数常作为控制生产过程的主要指标。

(3) 结构参数　在完成工艺过程的物料衡算和热量衡算以后，还要对工艺设备进行较详细的设计计算，才能正确决定如换热器、蒸馏塔、反应器等主要装置各部分的几何尺寸和工艺操作条件，以满足工艺过程的要求。上述表征设备结构特征参数如直径、高度等设备的几何尺寸称为结构参数。

(4) 无量纲量　这是一类由各种变量和参数组合而成的无量纲的纯数值数群。其中，量纲是指一些被测量之量的种类，例如，对于长度而言，无论用“米”或“厘米”来量度，这个量的种类总是长度，其量纲以 [L] 表示。同理，对时间、质量来讲，其量纲分别以 [T] 和 [m] 表示。利用量纲的概念按照量纲分析法可以导得特征数。如根据实验、分析和研究，可将影响管内流体流动类型的诸因素组合成一个数群 $\frac{du\rho}{\mu}$，称为雷诺（Reynolds）数，以 Re 表示。雷诺数的量纲为：

$$Re=\frac{du\rho}{\mu}=\frac{\mathrm{L}\cdot\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{T}}\cdot\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{L}^3}}{\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{L}\cdot\mathrm{T}}}=\mathrm{L}^0\mathrm{m}^0\mathrm{T}^0$$

所有量纲指数都等于零的量，称为无量纲量，如 Re，其量纲积或量纲为 $\mathrm{L}^0\mathrm{m}^0\mathrm{T}^0=1$。可见 Re 无论采用哪一单位制，其数值均相同。

二、单位与单位制

化工计算中所涉及的各种物理量，其大小都是用数与单位表示的。由于历史原因，在自

然科学和工程界曾使用过各种不同的单位制。有厘米·克·秒（cgs）制单位，称为绝对制或物理制；米·千克·秒（mks）制单位——米制；米·千克力·秒（mk_fs）制单位——重力制（工程制），还有英制单位等。

目前，我国法定计量单位是以国际单位制——SI（Le Système International d' Unités）单位为基础，根据我国具体情况，由国家选定了一些非国际单位制构成的。SI有两大优点：首先是具有通用性。所有物理量的单位都可以由七个基本单位——米（m）、千克（kg）、秒（s）、开（K）、摩（mol）、安（A）、坎（cd）导出；其次是它的一贯性。任何一个导出单位都可以由上述七个基本单位相乘或相除而导出。SI中，每种物理量只有一个单位，如热、功、能三者的单位都采用了焦尔，转换时无需因数。本书采用我国的法定计量单位。

三、单位换算

化工计算中所用到的公式一般分为两类：一类是根据物理规律建立的理论公式，反映过程所涉及的各物理量之间的关系，称为物理量方程。另一类是根据实验数据整理得到的经验公式，它只反映有关物理量的数值之间的关系，而数值的大小都是与一定单位相对应的，故在使用经验公式时，各物理量必须采用指定的单位。

由于目前数据来源不同，单位很不统一，特别是以往的手册、文献资料和书籍等仍然保留着非国际单位制，所以在进行化工计算时，经常会遇到单位的换算。在单位换算过程中，应当把单位和数值同时纳入换算，此时，必须将有关单位换算因数找出，然后相应地代入原单位中。本书附录一中，已收编了常用物理量的单位换算因数。

第二章　流体流动过程

第一节　　概述

化学工业中，大部分化学工艺流程都是伴随着化学反应、热量、质量传递的流动过程。化工厂内各种设备间纵横交叉连接着的许多管道，其目的就是为了完成流体输送任务。这种输送一般借助于流体输送机械、位差或压力差的作用，从而构成流体流动过程。石油工业也是这样，如油、水、气的抽吸和运输，以及石油中多种产品的提炼和分离等，也均在流体流动情况下进行。因此，研究流体流动的基本规律，研究流体流过某管道或设备时的速度分布、压力分布、能量损耗及其同固体壁之间的相互作用等，就是本章需要讨论的内容。学习和掌握这些内容就可以进行管路设计、流体输送机械的所需功率的计算和选择；同时，今后对热量传递和质量传递过程的研究亦离不开流体流动基本原理。

液体和气体统称流体。从力学特征来讲，流体是一种受到任何微小剪切力都能连续变形（流动）的物质，只要这种力作用，流体就会流动。研究流体流动时，通常将流体视为无数流体微团组成的连续介质。这些流体微团包含有足够的分子，能够用统计平均法求其宏观属性（例如：温度、密度、粘度、速度、压力、剪应力等），从而可以使人们通过观察这些参数的变化情况，即从宏观的角度去研究流体的流动规律，而摆脱对单个分子作随机的、混乱的复杂运动的考察。

流体的压缩性是流体的基本属性，任何流体都是可以压缩的，只是可压缩的程度不同而已。通常，为简化工程计算，把液体视为不可压缩流体，即忽略在一般工程中没有多大影响的微小体积变化，而把它的密度视为常数。气体比液体有较大的压缩性，故称为可压缩流体。特别是在流速较高，压力变化较大的场合，其体积的变化较大，必须视其密度为变数。但一般在常温常压条件下，气体通常也可以当作不可压缩流体处理。

第二节　　流体静力学基本方程式

流体静力学研究流体的平衡规律及其在工程实际中的应用。

一、流体的热力学属性

流体的密度 ρ、质量体积（比体积） v、压力 p、温度 T、热力学 U、焓 H、熵 S、定压热容 cp、粘度 μ、热导率 λ 等均属热力学属性。而 T，U，H，S 和 cp 等热力学属性，已经在物理化学课程中讨论功、热及能量平衡的问题时介绍过了，故此处不再赘述。控制流体摩擦效应和热传导效应的两个传输属性 μ 和 λ，则将分别在管内流体流动和传热过程中叙述。

1．密度

单位体积内流体所具有的质量，称为流体的密度。以符号 ρ 表示密度，m 表示质量，V 表示体积，则其表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{2-1}$$

密度的单位是 $kg \cdot m^{-3}$。

不同的流体密度是不同的，对一定的流体， 密度是压力和温度的函数，即

$$\rho = f(p,T) \tag{2-2}$$

除极高压力情况外，液体的密度随压力变化甚小。但其随温度稍有改变，故从手册或本书附录中查阅液体的密度数据时，要注意其所对应的温度。

化工生产中，所处理的物料多是含若干组分的混合物。对液体混合物而言，若混合前后体积不变，则可由下式求混合液的平均密度。

$$\frac{1}{\bar{\rho}} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \cdots \frac{w_n}{\rho_n} \tag{2-3}$$

式中 $w_1, w_2, \cdots, w_n$ ——液体混合物中各组分的质量分数；

$\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ —— 液体混合物中各组分的密度。

气体的密度随压力和温度的变化较大，当压力不太高、温度不太低时，气体的密度可近似地按理想气体状态方程式计算，即

$$\rho = \frac{pM}{RT} \tag{2-4}$$

式中 p ——气体的压力， $kN \cdot m^{-2}$或 kPa；

M ——气体分子的千摩尔质量， $kg \cdot kmol^{-1}$；

R ——气体常数，$8.314 kg \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}$；

T ——气体的热力学温度， K。

生产中，当气体混合物的压力、温度接近理想气体时，仍可用式（2-4）计算气体的密度。但式中气体分子的千摩尔质量 M 应以混合气体的平均千摩尔质量 $\overline{M}$ 代替，即

$$M = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \tag{2-5}$$

式中 $M_1, M_2, \cdots, M_n$ ——气体混合物中各组分的千摩尔质量， $kg \cdot kmol^{-1}$；

$y_1, y_2, \cdots, y_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔分数（或体积分数）。

通常，气体混合物的平均密度也可按下式进行计算：

$$\rho = \rho_1 y_1 + \rho_2 y_2 + \cdots + \rho_n y_n \tag{2-6}$$

2. 比体积

单位质量流体的体积，称为流体的比体积。用符号 v 表示，单位是 $m^3 \cdot kg^{-1}$，则

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \tag{2-7}$$

亦即流体的比体积为其密度的倒数。

3. 压力

单位面积上所受的流体垂直作用力，称为流体的压强，简称压强。工程技术上习惯称之为压力。设 ΔA 为流体中任意小的面积， ΔF 为与 ΔA 相邻的流体微团作用在该微元面积上的力，当 ΔA无限缩小并趋近于一点时，其上的压力为

$$p = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \tag{2-8}$$

在静止流体中，从各个方向作用于某一点的压力大小均相等，而作用于整个面积上的力称为总压力。

压力的单位为帕斯卡（Pascal），即 $N \cdot m^{-2}$，以 Pa 表示。其 10^5 倍为巴（bar），即：$1bar = 10^5 Pa$ （以前，工程上多采用大气压（atm）作为计量单位， $1atm = 1.013 \times 10^5 Pa$）。

压力值的表达方式可以有不同的计量基准，如以零压力（绝对真空）为基准的绝对压力。

还有相对于当地大气压力的相对值。若压力比大气压力高，则其差称为表压，可以下式表示

$$表压 = 绝对压力 - 大气压力$$

若比大气压低，其差值则称为真空度，即

$$真空度 = 大气压力 - 绝对压力$$

注意，此时绝对压力是指在负压操作情况下设备内剩余的绝对压力，亦称余压。

绝对压力、表压和真空度的关系，如图 2-1 所示。

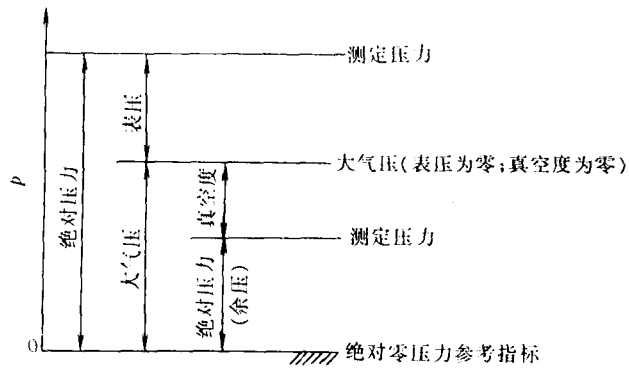

图 2-1 绝对压力、表压与真空度的关系

二、流体静力学基本方程式

流体静力学基本方程式是用于描述静止流体内部的压力随位置高低而变化的数学表达式。

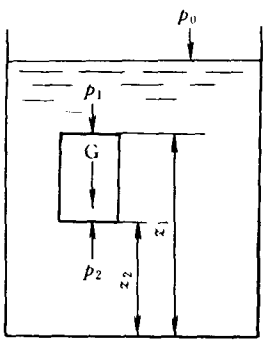

图 2-2 静力学基本方程的推导

如图 2-2 所示，容器中盛有密度为 ρ 的静止液体。现以刚化法从液体内部任意划出一底面积为 A 的垂直液柱。若以容器底部为基准水平面，液柱的上、下底面与基准水平面垂直距离分别 z_1 和 z_2，以 p_1 和 p_2 分别表示高度为 z_1 和 z_2 处的压力，液面上方的压力为 p_0。则在垂直方向上作用于此液柱的力有：

(1) 向上作用于液柱下底的总压力 p_2A；

(2) 向下作用于液柱上底的总压力 p_1A；

(3) 向下作用的液柱之重力 $G = \rho gA(z_1 - z_2)$。以向上作用的力为正，向下作用的力为负。静止液体中的三力之合应为零，故

$$p_2A - p_1A - \rho gA(z_1 - z_2) = 0$$

简化得

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) \tag{2-9}$$

或

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} \tag{2-9a}$$

若液柱上表面取在液面上，液柱高度 $z_1 - z_2 = h$，则上式可写成

$$p_2 = p_0 + \rho gh \tag{2-9b}$$

$$\frac{p_2 - p_0}{\rho g} = h \tag{2-9c}$$

以上诸式，均称为流体静力学基本方程式。它说明了在重力作用下，静止液体内部压力的变化规律。

三、流体静力学基本方程式的讨论

由式（2-9b）可知：

（1）当容器液面上方的压力 p_0 一定时，静止流体内任一点压力的大小，与液体本身的密度 ρ 和该点距液面的深度 h 有关。因此，在静止的、连通的同一种液体内，处于同一水平面上的各点的压力都相等。此压力相等的水平面，称为等压面。

（2）当 p_0 改变时，液体内部各点的压力也将发生同样大小的改变。

（3）由式（2-9c）可知，压力或压力差的大小可用液柱高度来表示。由此引伸出压力的大小也可以用一定高度的液柱来表示，这就是压力可以用 mmHg、mH_2O 等单位计量的依据。

（4）为说明静力学基本方程式中各项意义，将式（2-9）两边同除以 ρg 并加以整理可得

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \tag{2-9d}$$

或

$$z + \frac{p}{\rho g} = 常数$$

四、流体静力学基本方程式的应用

1. 压力测量

（1）U形管压差计　U形管压差计（亦称压力计、压强计等）的结构如图 2-3所示。它是在一根 U 形玻璃管中放入某种液体作指示液。指示液必须与被测流体不互溶，不起化学反应，视所测系统压力的大小和分辨率的要求，指示液可选择水、酒精、四氯化碳或水银等。测量时，将 U 形管的两端与管道中的两截面相接，若作用于压差计两端的压力 $p_1 > p_2$（图 2-3），则指示液就会出现高度差。利用此压差计的读数 R 的值，再根据流体静力学基本方程式，就可以算出两截面的压力差（$p_1 - p_2$）的大小。

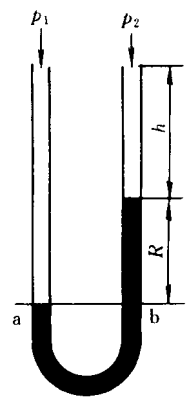

图 2-3　U 形管压差计

在图 2-3 中，U形管内盛有密度为 ρ_0 的指示液，被测流体密度为 ρ，$\rho_0 > \rho$。图中 a、b 两点处在连通的同一种静止流体内，并且在同一水平面上，所以这两点的静压力相等，即 $p_a = p_b$。

根据流体静力学基本方程，U形管左侧：

$$p_a = p_1 + (h + R)\rho g$$

同理，U形管右侧：

$$p_b = p_2 + h\rho g + R\rho_0 g$$

因为

$$p_a = p_b$$

所以

$$p_1 + (h + R)\rho g = p_2 + h\rho g + R\rho_0 g$$

根据增量定义，$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$，故压降

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_0 - \rho)gR \tag{2-10}$$

若被测量流体是气体，由于气体密度 ρ 比指示液密度 ρ_0 小得多，故 $\rho_0 - \rho \approx \rho_0$，则此种情况下，上式可写成

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho_0 gR \tag{2-10a}$$

U 形管压差计不仅可以用上述连接方式测量两截面之间的压差，而且还可以一侧通待测压力，另一侧通大气，这样就可以测得该点与大气压之差，即该点的表压或真空度。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com