

全国高等医药院校药学类实验教材

化工原理实验

(第二版)

主编 礼 彤



中国健康传媒集团
中国医药科技出版社



全国高等医药院校药学类实验教材

化工原理实验

(第二版)

主 编 礼 彤

主 审 周丽莉

编 者 (以姓氏笔画为序)

王立红 礼 彤 赵宇明



中国健康传媒集团
中国医药科技出版社

内 容 提 要

本书为“全国高等医药院校药学类实验教材”之一。全书分为4章：第一章为基础实验，第二章为综合性与演示性实验，第三章为实验误差分析与数据处理，第四章为化工参数的测量与常用仪器仪表的使用。通过实验课程的学习，使学生能运用已学的知识验证一些结论、结果和现象，或综合运用已学的理论知识设计实验，有助于培养学生对理论知识的运用能力、实验操作能力、仪器仪表的使用能力、实验现象的观察分析能力以及实验数据的处理分析能力。

本书供高等医药院校药学类专业使用，也可作为相关专业的实验教学参考书及企业培训教材使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理实验/礼彤主编. —2版. —北京: 中国医药科技出版社, 2019. 2

全国高等医药院校药学类实验教材

ISBN 978 - 7 - 5214 - 0791 - 4

I. ①化… II. ①礼… III. ①化工原理 - 实验 - 医学院校 - 教材 IV. ①TQ02 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 026849 号

美术编辑 陈君杞

版式设计 郭小平

出版 中国健康传媒集团 | 中国医药科技出版社

地址 北京市海淀区文慧园北路甲 22 号

邮编 100082

电话 发行: 010 - 62227427 邮购: 010 - 62236938

网址 www.cmstp.com

规格 787 × 1092mm $\frac{1}{16}$

印张 6 $\frac{3}{4}$

字数 134 千字

初版 2014 年 12 月第 1 版

版次 2019 年 2 月第 2 版

印次 2019 年 2 月第 1 次印刷

印刷 北京市密东印刷有限公司

经销 全国各地新华书店

书号 ISBN 978 - 7 - 5214 - 0791 - 4

定价 19.00 元

版权所有 盗版必究

举报电话: 010 - 62228771

本社图书如存在印装质量问题请与本社联系调换

全国高等医药院校药理学类规划教材常务编委会

- 名誉主任委员 邵明立 林蕙青
- 主任委员 吴晓明 (中国药科大学)
- 副主任委员 (以姓氏笔画为序)
- 刘俊义 (北京大学药学院)
- 匡海学 (黑龙江中医药大学)
- 毕开顺 (沈阳药科大学)
- 吴春福 (沈阳药科大学)
- 张志荣 (四川大学华西药学院)
- 姚文兵 (中国药科大学)
- 高思华 (北京中医药大学)
- 彭 成 (成都中医药大学)
- 委 员 (以姓氏笔画为序)
- 田景振 (山东中医药大学)
- 李 高 (华中科技大学同济药学院)
- 李元建 (中南大学药学院)
- 杨 波 (浙江大学药学院)
- 杨世民 (西安交通大学药学院)
- 陈思东 (广东药科大学)
- 侯爱君 (复旦大学药学院)
- 宫 平 (沈阳药科大学)
- 祝晨蓀 (广州中医药大学)
- 柴逸峰 (第二军医大学药学院)
- 黄 园 (四川大学华西药学院)
- 朱卫丰 (江西中医药大学)
- 秘 书 夏焕章 (沈阳药科大学)
- 徐晓媛 (中国药科大学)
- 沈志滨 (广东药科大学)

前 言

化工原理是工程类课程中重要的专业基础课之一，是医药院校工学学士必备的基础知识，化工原理实验作为在学习化工原理理论课的基础上进行的一个实践性环节，在该课程中占有相当重要的地位。因为理论课所涉及的化工单元操作的基本原理、典型设备构造及工艺尺寸设计、选型等内容和方法，均与实验研究紧密相联，实验要求学生运用已学的知识验证一些结论、结果和现象，或综合运用已学的理论知识设计实验，或进行综合性实验，有助于学生对课堂基本概念、理论公式等的理解，同时训练和培养学生对理论知识的运用能力、实验操作能力、仪器仪表的使用能力、实验现象的观察分析、实验数据的处理和分析能力。随着制药工业的飞速发展，新技术、新设备不断出现，为适应新形势的发展要求，也应加强学生实践环节、创造性和独立工作能力的培养，为将来打下一定的实验科研基础。

本教材是以化工单元操作实验研究中常用的基础技术为主要内容，结合实际应用编写而成，主要包括管道阻力、离心泵性能、液体精馏、气体吸收、固体干燥、液-液萃取等验证性实验。在新型技术方面设立了超临界流体萃取、喷雾干燥等实验，并设置了设计性和综合实验，充分发挥学生的主动性、主体性，让学生去创造、去设计实验并进行实验验证。为增加学生的感性认识，加强对课堂内容的理解记忆，开设了演示实验。随着科学技术的发展，为顺应计算机的应用需求，开设了计算机数据采集的综合性实验。在第一版《化工原理实验》的基础上，对已经陈旧的知识、数据进行了更新，主要体现在实验五填料塔的气体吸收，实验六筛板塔连续精馏过程。

本教材由沈阳药科大学的周丽莉教授担任主审，参加编写工作的有王立红（实验一至实验四），礼彤（绪论、实验五至实验十四、第三章及附录），赵宇明（第四章以及第一章和第二章中的插图绘制）。

成书过程中，沈阳药科大学教务处给予了大力支持和严格把关，在此表示诚挚的谢意。对书中所引用文献资料的作者和单位，谨表示衷心感谢。

由于编者的水平有限，加之时间仓促，书中不妥之处在所难免，衷心希望各位老师 and 同学提出批评和改进意见，使之能及时得到修正和补充。

编者
2018年12月

绪论	1
一、化工原理实验课程的教学目的	1
二、化工原理实验课程的教学要求	1
第一章 基础实验	4
实验一 流体流动阻力的测定	4
实验二 离心泵特性曲线的测定	9
实验三 换热器性能参数测定设计	13
实验四 干燥	17
实验五 填料塔的气体吸收	21
实验六 筛板塔连续精馏过程	28
实验七 转盘式萃取塔性能的测定	33
实验八 连续反应器停留时间分布的测定	38
第二章 综合实验与演示实验	44
实验九 雷诺演示	44
实验十 机械能转化演示	46
实验十一 旋风分离器分离效果观察	48
实验十二 固体流态化实验	49
实验十三 超临界流体萃取	53
实验十四 喷雾干燥	57
第三章 实验误差分析与数据采集、处理	60
一、实验数据的误差分析	60
二、实验数据的采集	61
三、实验数据的处理	63
第四章 化工参数的测量与常用仪器仪表的使用	72
一、温度的测量	72
二、压力的测量	78
三、流量的测量	85
附录	92
一、DDS -11A 型电导率仪	92
二、铜 - 康铜热电偶分度表	94

三、水的蒸气压	95
四、各种换热方式下对流传热系数的范围	96
五、几种常用混合液的气液平衡数据	96
六、氨-水系统平衡常数	98
七、湿空气的 H-I 图 ($P = 101.325\text{kPa}$)	98
八、常用作超临界流体萃取溶解的流体临界性质	99
参考文献	100

绪 论

化工原理实验是一门教学实践性很强的专业基础课程,与化工原理课堂教学、实习、化工设计等教学环节相互衔接,构成一个有机整体,涵盖了动量传递、热量传递、质量传递及化学反应工程等方面的教学内容,是医药院校工学学士必备的专业基础知识,为学生今后在实际工作中从事制药设备选型与设计、制药过程改造、车间设计和科学研究奠定理论基础,但与其他基础实验不同,化工原理实验属于工程实验范畴,面对的是错综复杂的工程问题,涉及诸多的影响因素和大小各异的设备与流程。开设化工原理实验课程,可以对学生进行工程技术的基础技能、研究工程问题的思维方法以及创新能力进行综合素质训练,加深对化学工程基本原理和基本概念的理解,提高分析问题和处理解决实际问题的能力,为今后实际工作打下良好的基础。

一、化工原理实验课程的教学目的

化工原理实验作为化学工程基础课程的重要组成部分,是理论联系实际的重要环节,通过实验达到如下目的。

1. 巩固和强化相关理论知识学习 通过实验课程,验证各化工单元操作过程的机理、规律,巩固和强化在化工原理课程中所学的基本理论,使学生对基本原理、各种参数的来源以及使用范围等有更深入地理解和认识;熟悉典型单元操作的工艺流程和设备,以及化工常用仪器仪表的使用;掌握工程实验的一般方法和技巧,如操作条件的确定、实验操作、测试仪表的选择、数据采集和故障分析等。

2. 培养学生从事实验研究的能力 理工科高等院校的毕业生,应具备一定的实验研究能力,主要包括:为完成一定的研究课题,收集组织相关文献和信息,设计实验方案的能力;进行实验,观察和分析实验现象的能力;正确选择和使用测量仪表的能力;利用实验的原始数据进行数据处理以及获得实验结果的能力;运用文字编写技术报告的能力等。通过一定的实验练习和反复训练,学生掌握各种实验能力,为将来在实际工作中独立地进行新实验和科研开发打下一定的基础。

3. 培养学生严谨求实的作风 化工原理实验研究是实践性很强的工作,要求学生具有一丝不苟的工作作风和严肃认真的工作态度,从实验操作、现象观察、实验观测到数据记录和处理等各个环节都不能丝毫马虎,必须实事求是,不能有半点虚假。

总之,实验教学对于学生的培养是不容忽视的,对学生动手和解决实际问题能力的锻炼是书本无法代替的。

二、化工原理实验课程的教学要求

化工原理实验设备较大,实验装置的控制点较多,操作比较复杂,要求学生必须以严谨的科学态度和实事求是的作风,明确实验目的,认真进行实验预习、数据记录、实验设计,完成实验报告,做好每个实验以达到实验的预期目的,切实收到教学效果。

1. 实验预习 预习是实验教学的关键环节。实验前,学生必须认真地研读实验指导书,清楚地了解实验目的、要求、原理及注意事项,对于实验所涉及的测量仪表也要预习它们的使用方法;在独立思考和小组讨论的基础上拟定实验方案,明确实验中应测取的数据,并预估实验数据变化规律或范围;最后在预习的基础上写出实验预习报告,内容主要包括实验目的、原理、装置流程、实验步骤及注意事项等,最好能结合实验指导教材进行现场了解,做到心中有数,经指导教师提问检查认可后方可进行实验。

2. 实验操作 实验操作是实验教学的核心环节,是学生动脑动手进行训练的重要过程,通过操作学生可理解和领会各单元操作的设备和流程,了解如何实现过程的优化,分析非正常现象产生的原因并研究可能采取的措施。

实验过程中,学生必须要严格按照操作规程进行,注意要安排好测量点的范围,测量点数目,密切注意仪表示数的变化,调节时应细心、操作平稳,一定要在过程稳定后才能取样或读取数据。对于实验过程中的现象要仔细观察,不能只顾操作和读数,培养勤于观察和善于观察的习惯,因为实验现象往往与过程的内在机制、规律密切相关。实验数据要如实记录在预先拟好的原始数据表格内,并注明符号、单位、条件等,实验现象也要尽量详细地记录在记录本内,有些当时不能理解的实验现象,重复进行一遍仍然如此,须如实记录。待实验结束后,与老师或其他同学一起认真讨论异常现象发生的原因,及时发现问题并解决问题,或者对现象做出合理的分析解释,培养学生严谨的科学作风,养成良好的习惯。实验结束后,按操作规程关闭实验仪器设备,检查水、电、气关闭情况,做好卫生工作后方可离开。

3. 实验报告 实验报告是对实验进行总结的技术文件,是学生用文字表达技术资料的一种训练,学生对实验报告必须给予足够的重视,学会用准确的图形、科学的数字和观点来书写报告。训练编写实验报告的能力,为今后写好研究报告和科研论文打好基础。

实验报告的基本要求是表达准确、简洁、条理清楚、书写工整。实验结束后,实验数据可以小组共享,但数据的处理和报告的编写,必须每个学生独立完成。实验报告是考核实验成绩的主要方面,应认真对待。实验报告内容可在预习报告的基础上完成,主要包括以下内容。

(1) 报告的题目(要简明确切)。

(2) 报告人及同组人员的姓名。

(3) 实验的目的、理论依据。

(4) 实验设备说明(应包括流程示意图和主要设备、仪表的类型及规格),操作要领和操作步骤。

(5) 实验数据记录(应包括与实验结果有关的全部数据)。

(6) 数据整理及计算示例。引用的数据最好注明来源,要列出一次数据的计算过程,作为计算示例,其余数据可列表,同一小组成员应采用不同的实验数据,不要重复。

(7) 实验结果。要根据实验任务明确提出本次实验的结论,用图示法、经验公式

或列表法表示,并注明实验条件。

(8) 分析讨论。要对实验结果作出评价、分析误差大小及原因,并对实验中发现的问题进行讨论,对实验方法、实验设备有何改进建议也可写入此栏。

(9) 回答思考题。在每一个实验后面都附有思考题,旨在加深学生对实验原理的理解,要求学生结合实验并查阅有关资料认真回答。

第一章 基础实验

实验一 流体流动阻力的测定

【实验目的】

1. 掌握管件、阀门等局部阻力系数 ζ 的测定方法，了解影响局部阻力系数的因素。
2. 掌握双对数坐标系的用法。
3. 熟悉测定流体流经直管和管阀件时阻力损失的实验组织方法及测定摩擦系数的工程意义。
4. 了解涡轮流量计、差压变送器的工作原理及其标定方法，熟悉组成管路中的各个管件、阀门及其作用。
5. 测定光滑直管及粗糙直管的摩擦系数 λ ，并掌握摩擦系数 λ 与雷诺准数 Re 和相对粗糙度 ε/d 之间的关系及其变化规律。

【基本原理】

1. 直管摩擦系数 λ 和雷诺准数 Re 的测定 通过课堂学习，我们已知道直管摩擦系数 λ 是雷诺准数 Re 和该管相对粗糙度 ε/d 的函数，即 $\lambda = f(Re, \varepsilon/d)$ 。对于一段特定的管路，其相对粗糙度是个定值，此时摩擦系数仅与雷诺准数有关，即 $\lambda = f(Re)$ 。

对于圆形直管，阻力损失与摩擦系数之间有如下关系

$$H_f = \lambda \frac{l u^2}{d 2g} \quad (1-1)$$

式中， H_f 为压头损失，m； l 为管长，m； d 为管径，m； u 为流速， $m \cdot s^{-1}$ ； λ 为摩擦系数，无因次。

应用式 (1-1)，对于一段已知管长、管径的圆形直管，在一定流速下，测出其阻力损失，然后按式 (1-2) 可求出摩擦系数 λ 。

$$\lambda = H_f \frac{d 2g}{l u^2} \quad (1-2)$$

设备确定时，我们可以指定一段管路，测出管长 l 和管径 d （对本实验均为已知量）。而流体流速 u 可以通过测定体积流量 V_s 来确定，根据

$$u = \frac{V_s}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

其中流量采用涡轮流量计测量，涡轮流量计的流量表采用智能流量计算机，可直接读取流量值。

解决问题的关键在于确定某一流速下流体流经此段管路时的压头损失 H_f 。

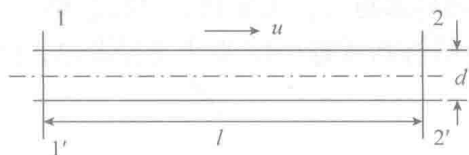


图 1-1 圆形直管中流体机械能恒算示意图

如图 1-1 所示, 以直管的中心轴线为基准面, 在截面 1-1' 和 2-2' 间的列柏努利方程, 得

$$Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + H_f$$

整理得

$$H_f = (Z_1 - Z_2) + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$$

而对于水平等径直管, 有 $Z_1 = Z_2$, $u_1 = u_2$

$$\text{所以} \quad H_f = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可得, 只要测出这两个截面间的静压差即可得到压头损失 H_f , 最简单的方法就是在两个截面间安装压差计。本实验静压差测量均采用压差传感器 (注: 压差传感器是将压差转换成电信号再用仪表显示), 通过压差传感器变送信号, 连接到智能数字表直接显示压差, 即为管中阻力损失 H_f 。

$$\text{此时} \quad \lambda = H_f \frac{d}{l} \frac{2g}{u^2} = H_f \frac{d}{l} \frac{2g \left(\frac{\pi d^2}{4} \right)^2}{V_s^2} = \frac{H_f g \pi^2 d^5}{8l V_s^2} \quad (1-4)$$

雷诺准数 $Re = \frac{du\rho}{\mu}$, 其中 ρ 、 μ 为水的物性常数, 通过确定定性温度可在有关手册中查取, d 是管径, 流速 u 可通过体积流量 V_s 计算出, 则

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{d\rho}{\mu} \frac{V_s}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4\rho V_s}{\mu \pi d} \quad (1-5)$$

温度一定时, 水的 ρ 、 μ 为常数, 对于固定管路, 管径 d 也为常数, 这样, 只要不断地改变体积流量 V_s , 测出阻力损失 H_f , 就可根据式 (1-4) 计算出 λ , 再根据式 (1-5) 计算出 Re , 即可获得一系列 λ 值与 Re 值。在双对数纸上描绘并连接相应各点, 便可获得 $\lambda - Re$ 关系图。

2. 局部阻力系数的测定 流体通过某一管件或阀门的局部阻力损失用流体在管路中动能的函数表示, 即

$$H_f = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (1-6)$$

式中, H_f 为局部阻力损失, m; u 为管中流体流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ζ 为局部阻力系数, 无因次。

实验中, 只要测定出流体经过管件时的阻力损失 H_f 及流体通过管路的流速 u , 再由式 (1-6) 即可计算出局部阻力系数。由于管件两侧距测压孔间的直管长度很短,

所以引起的直管阻力损失和局部阻力损失相比,可以忽略不计。同直管摩擦系数测定方法一样, H_f 的值可应用柏努利方程由压差计读数求出, 流速 u 由涡轮流量计读数求出。

【装置与流程】

实验装置流程如图 1-2 所示。离心泵 3 从循环水箱 1 吸入水, 经出口阀门 4, 涡轮流量计 5 到管路阻力测量系统, 最后回到水箱 1。管内水的流量由涡轮流量计 5 测定, 调节出口阀门 4 可改变管内流体的流速, 从而计算不同状态下摩擦系数、雷诺准数及局部阻力系数。

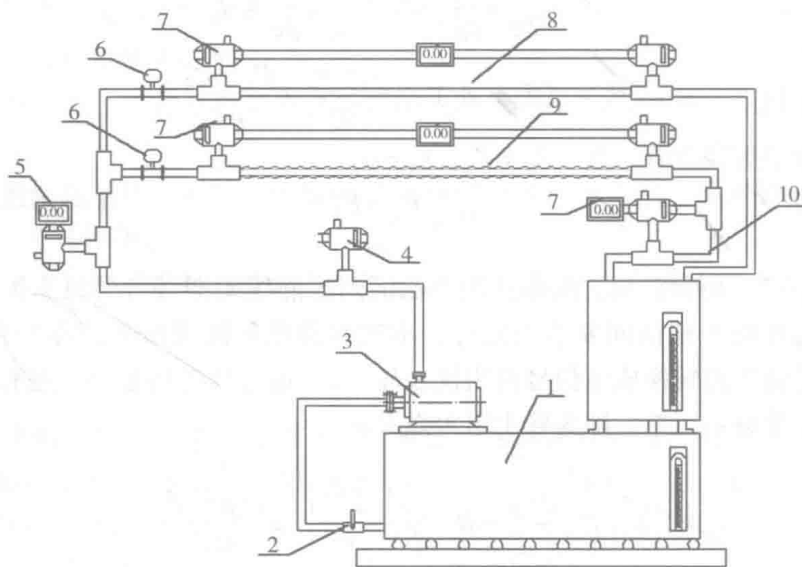


图 1-2 流体流动阻力的测定实验流程示意图

1-水箱; 2-底阀; 3-离心泵; 4-出口阀门; 5-涡轮流量计; 6-电磁阀;
7-压差计; 8-光滑管; 9-螺纹管; 10-弯头

实验设备使用的注意事项如下。

- (1) 实验前将水箱充满水, 以备循环使用。
- (2) 使用离心泵时应注意以下几点。① 离心泵启动前要灌水排气, 防止气缚现象的发生; ② 开启离心泵前, 要关闭出口阀门; ③ 停车前要先关闭出口阀门。
- (3) 实验前务必将系统内存留的气泡排除干净。
- (4) 在实验过程中每调节一个流量后应待流量和压降数据均稳定后, 方可进行数据采集。
- (5) 若实验装置长期不用时, 尤其是冬季, 应将管路系统和水槽内水排放干净。

【操作步骤】

- (1) 检查各设备、仪表是否完好。
- (2) 引水灌泵。关闭离心泵的出口阀门, 进入管道阻力实验计算机数据采集系统, 在试验项目下选取管路系统, 然后启动泵, 同时打开底阀和所测管路上的电磁阀。
- (3) 调节流量。使流量依次从小到大变化, 每次流量调节稳定后读取各参数, 并

读取水温；

(4) 结束管道阻力测定实验后，退出实验计算机数据采集系统，关闭出口阀门，停泵。

【数据记录与整理】

1. 实验原始数据的记录

实验日期：_____年_____月_____日

直管材质：_____

光滑直管：内径_____ 长度_____

粗糙直管：内径_____ 长度_____

表 1-1 光滑直管阻力测定原始数据记录表

序号	光滑直管压差计示值/kPa	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	水温/ $^{\circ}\text{C}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

表 1-2 粗糙直管阻力测定原始数据记录表

序号	粗糙直管压差计示值/kPa	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	水温/ $^{\circ}\text{C}$
1			
2			
3			
4			
5			

续表

序号	粗糙直管压差计示值/kPa	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	水温/ $^{\circ}\text{C}$
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

表 1-3 局部阻力系数测定原始数据记录表

序号	弯头压差计示值/kPa	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	水温/ $^{\circ}\text{C}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

2. 实验计算结果的整理

表 1-4 光滑直管管道阻力测定计算结果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Re												
λ												

表 1-5 粗糙直管管道阻力测定计算结果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Re												
λ												

表 1-6 局部阻力系数测定计算结果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Re												
λ												

【结论与讨论】

1. 对实验数据进行处理, 处理过程中必须有一组数据的计算示例。
2. 在双对数坐标纸上绘制 $Re - \lambda$ 关系图, 并描述图的特点。

【思考题】

1. 本实验用水为工作介质做出的 $Re - \lambda$ 曲线, 对其他流体能否适用? 为什么?
2. 实验测试时为什么要取同一时刻下的瞬时数据?
3. 为什么本实验数据须在双对数坐标纸上标绘?
4. 在不同设备上 (包括不同管径)、不同水温下测定的 $Re - \lambda$ 数据能否关联在同一条曲线上?

实验二 离心泵特性曲线的测定**【实验目的】**

1. 熟悉离心泵特性曲线的应用。
2. 了解离心泵的结构和特性、掌握其操作方法。
3. 学习离心泵特性曲线的测定方法。

【基本原理】

离心泵是输送液体的常用机械, 在选用泵时, 一般总是根据生产任务要求的扬程和流量, 较高的工作效率, 参照离心泵的特性来决定其型号。对于一定类型的离心泵来说, 其特性就是指在一定的转速下, 离心泵的流量 Q 变化时, 扬程 H_e 、轴功率 $N_{\text{轴}}$ 、效率 η 的变化规律, 它主要包括 $H_e - Q$ 曲线、 $N_{\text{轴}} - Q$ 曲线、 $\eta - Q$ 曲线。因此, 离心泵在出厂前由制造厂测定这三条曲线, 作为离心泵选择的依据。

通过 $H_e - Q$ 曲线, 我们可以预测在一定的管路系统中, 这台离心泵实际流量的大小, 能否满足生产需要。有了 $N_{\text{轴}} - Q$ 曲线, 可以预测这种类型的离心泵在某一流量下运行时, 拖动它要消耗多少能量, 这样可以配置一台大小合适的动力设备。观察 $\eta - Q$ 曲线, 可以预测这台离心泵在某一流量下运行时效率的高低, 使离心泵能够在适宜条件下运行, 以发挥其最大效率。

但是, 离心泵的特性曲线目前还不能用解析方法进行计算, 仅能通过实验测定, 所以我们要学会测定离心泵特性曲线的方法。

1. 流量 Q 的测定 涡轮流量计的流量表采用智能流量计算机, 可直接读取流量值。欲改变流量需阀门控制 (手动或自动改变阀门的开度)。

2. 扬程 H_e 的测定 对图 1-3 所示的系统, 以泵的入口截面为基准面, 在一定流量下, 在离心泵进、出口两截面间列柏努利方程, 可得

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H' = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \Sigma H_{\text{损}}$$

进一步整理得到

$$H_e = H' - \sum H_{\text{内}} = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1)$$

式中, ρ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; p_1 、 p_2 为分别为泵进、出口的流体压力, Pa; u_1 、 u_2 为分别为泵进、出口的流体流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

其中 $Z_2 - Z_1 = h_0 = 100\text{mm}$, $u_1 \approx u_2$,

$$\text{因此} \quad H_e = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + h_0 \quad (1-7)$$

在离心泵的进、出口分别安装真空表和压力表, 每改变一个流量, 就可测出相应的 p_1 、 p_2 值, 利用式 (1-7) 即可求得相应的扬程 H_e 值。

3. 轴功率的测定 轴功率是电机给泵的功率, 轴功率测量采用测功器, 能直接测出离心泵的轴功率 (kW)。

4. 效率 η 的测定 泵的效率是泵的有效功率 N_e 与轴功率 $N_{\text{轴}}$ 的比值。有效功率 N_e 是单位时间内流体经过泵时所获得的实际功率, 轴功率 $N_{\text{轴}}$ 是单位时间内离心泵从电机得到的功率, 两者差异反映了水力损失、容积损失和机械损失的大小。泵的有效功率 N_e 可按式 (1-8) 计算, 即

$$N_e = H_e \cdot V \cdot \rho \cdot g \quad (1-8)$$

$$\eta = \frac{N_e}{N_{\text{轴}}} \times 100\%$$

5. 转速改变时的换算 泵的特性曲线是在一定转速下的实验测定所得。但是, 实际上感应电动机在转矩改变时, 其转速会有变化, 这样随着流体流量 Q 的变化, 多个实验点的转速 n 将有所差异, 因此在绘制特性曲线之前, 须将实测数据换算为某一定转速 n' 下 (可取离心泵的额定转速) 的数据。换算关系如下

流量	$Q' = Q \frac{n'}{n}$
扬程	$H' = H \left(\frac{n'}{n}\right)^2$
轴功率	$N'_{\text{轴}} = N_{\text{轴}} \left(\frac{n'}{n}\right)^3$
效率	$\eta' = \frac{Q' H' \rho g}{N'_{\text{轴}}} = \frac{Q H \rho g}{N_{\text{轴}}} = \eta$

【装置与流程】

实验装置流程如图 1-3 所示。离心泵 7 从循环水箱 6 吸入水, 经出口阀门 4、涡轮流量计 5 到管路阻力测量系统, 最后回到水箱 6。管内水的流量由涡轮流量计 5 测定, 调节出口阀门 4 可改变管内流体的流速, 从而测定不同流量下的扬程、轴功率及效率。