

高等学校教学用书

化工原理解题指南

第二版



阮奇·叶长燊 编

重点归纳

难点解析

学习考研必备



化学工业出版社

高等学校教学用书

化工原理解题指南

第二版

阮 奇 叶长燊 编



化学工业出版社

· 北京 ·

中国石化出版社

南能型输型气工出

张 艳

装帧设计：韩 飞

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理解题指南/阮奇, 叶长燊编. —2 版. —北京:
化学工业出版社, 2008. 6

高等学校教学用书

ISBN 978-7-122-03390-1

I. 化… II. ①阮…②叶… III. 化工原理-高等学校-
解题 IV. TQ02-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 105119 号

责任编辑: 何 丽

文字编辑: 张 艳

责任校对: 陈 静

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 436 千字 2008 年 9 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.80 元

版权所有 违者必究

第二版前言

本书将第一版《化工原理优化设计与解题指南》中的解题指南部分独立成书，保留其中的大部分内容及主体框架，删去一些不常用、不重要的内容，如不稳定流动、不稳定传热、沉降、两股进料吸收、吸收液部分循环、变干燥条件的干燥时间等计算内容；腾出篇幅，编进了流体流动、流体输送机械、过滤、传热、单效蒸发、吸收、精馏、干燥等单元操作的解题关系图、题型及解法分析、一种问题多种解法，更新了各单元操作的部分典型例题及习题。

其次，将创造性思维方法与化工原理课程教学有机地结合在一起，创新了写法：用发散思维方法，从不同角度、不同途径去探讨同一问题的多种解法，分析比较不同解法的优缺点及适用场合，便于读者解题时选优汰劣，用最好的方法解题；用抽象、概括等收敛思维方法总结各章的解题关系图，从图中的一个关键知识点出发可延伸联想到许多相关知识点以及这些知识点间的相互关系，便于读者复习各知识点及考前准备；用分析、综合等收敛思维方法对各单元操作的主要题型及解法进行分类、总结、分析，题型分类清晰、总结全面，解法分析深入、细致，但仍留下相当部分的题型解法由读者延伸分析，便于读者熟练掌握各单元操作的主要题型及解法，提高解题思维能力和解题实战能力；用联想思维方法介绍相关单元操作的知识点；用逆向思维方法求解典型例题等。总之，将创造性思维方法与化工原理课程的知识点有机地结合在一起编写，是本书编写的创新。

高等教育的最高价值追求是培养创新型人才，以适应建设创新型国家对人才的需求。培养创新型人才的方法固然很多，但把创新型思维方法有机地融入各门课程知识点的讲授无疑是一个很好的方法，对此编者始终坚信不渝，并在化工原理课程教学中身体力行。本书仅是编者对此问题的抛砖引玉，盼望广大读者及同行赐教。

本书由阮奇、叶长燊主编，李玲参编。第1、2、4章由阮奇、李玲共同执笔；第3章由叶长燊执笔；第5~7章由阮奇执笔；第8章由叶长燊、阮奇共同执笔；全书由阮奇统稿。特别感谢：浙江大学谭天恩教授、北京化工大学杨祖荣教授、中山大学祁存谦教授长期以来对福州大学化工原理课程建设及编者的大力支持、帮助和指导；福州大学汤德平教授、赵剑曦教授、陈建中教授、吴燕翔教授、李晓教授对化工原理精品课程及教学团队建设的大力支持、帮助和指导；福建省级精品课程（福州大学化工原理课程）及福建省级教学团队（福州大学化学工程与工艺专业教学团队）建设基金的资助；福州大学化工原理教学团队龚琦副教授、张星讲师对本书第一版存在错误的指正；博士生严佐毅，硕士生袁锦瑞、张友华、王延军、苏宁子等为书稿的录入与校对所做的大量工作。

由于编者才疏学浅、水平有限，书中不当之处在所难免，恳请广大读者和同行批评指正，日后本书若有机会再次付梓，定当采纳大家的金玉良言，不胜感激。

编者的联系方式：hys@fzu.edu.cn。

编者

2008年5月于福州大学

第一版序言

化工原理是化学工程与工艺及相近专业的一门主干课，在培养学生的素质与能力方面起着举足轻重的作用。本书编者从事化工原理教学多年，积累了丰富的教学经验，取得了较好的教学效果。编者将最优化技术融入化工原理课程设计教学实践中，在教学内容的改革上有所突破，并经多年教学实践证明对培养学生树立工程最优化的观点，提高学生综合应用知识的能力、数学建模的能力及应用计算机的能力，效果显著，这是本书的一大特色。解题指南部分是编者多年化工原理课程教学经验的结晶，计算题与概念题并重，注意题型分析、归纳，强调解题方法的总结、解题思维的训练、解题思路的开拓、解题能力的提高是本书的另一特色。此外，还应用 CAI 课件等现代化教学手段提高化工原理课程教学质量。相信本书的出版能对化工原理课程的教与学起到推动作用，对工程技术人员也有所启发。

谭无思
2001年4月

香

学大南南午民 2 年 8005

第一版前言

最优化技术是一门新兴的应用性很强的技术，它是研究在一定条件下如何用最小的代价获得最佳的效果。近年来，随着计算机技术的迅猛发展与普及，最优化技术在化工领域的应用越来越广泛，越来越多的化工工程设计问题希望通过适当的数学方法处理，经由计算机的计算得到最优设计的效果。因此，如何在教学中培养学生的优化意识，使学生初步掌握最优化技术，让学生在走出校门之后能够应用最优化技术去分析和解决工程设计问题是新世纪高等教育面临的重要问题。

为提高人才的培养质量，作者以既传授知识更注重培养和提高学生的科学素质与综合能力的教学思想为指导，从1994年开始引入工程经济观点、工程最优化技术和计算机辅助设计技术，在国内首先进行“化工原理课程优化设计”的教学研究与实践。近四年，作者又运用现代化知识和技术创新设计手段，利用可视化语言 Visual Basic 5.0 和多媒体制作软件 Authorware 5.0，在国内首先开发成功“化工原理课程优化设计多媒体 CAI 课件”，并将课件应用于化工原理课程优化设计教学实践。课程优化设计及 CAI 课件的开发与应用，在教学内容、方法、手段的改革上取得重要突破，经多年的教学实践证明，对培养学生的科学素质与综合能力效果显著。

“化工原理课程优化设计的教学研究与实践”教育改革项目获得2001年国家级高等教育教学成果二等奖。作者将该成果的主要内容加以总结、提炼，编写了本书的第一篇——化工原理优化设计。主要内容包括常用工程数值方法、单变量和多变量最优化方法、列管换热器、多效蒸发系统、吸收塔、精馏塔、干燥器的优化设计和优化设计多媒体 CAI 课件简介等九章。第一篇的主要对象是希望用数值方法和最优化方法解决化工单元过程优化设计问题的有关专业高年级学生和工程技术人员，对他们而言掌握这些方法的应用比了解这些方法的数学理论显得更为重要。因此，第一篇对数学方法不作详细的推导论证而侧重其应用，重点讲述这些方法的基本原理、方法本身的介绍、使用这些方法时应该注意的问题，给出了各种方法的 FORTRAN 程序及部分方法的程序框图，突出主要化工单元优化问题的分析、数学模型的建立、优化方法的具体应用。第一篇的内容可作为高等院校化工类及相近专业学生的化工原理课程设计教材。

本书第二篇的内容是化工原理解题指南，包括流体流动、流体输送机械、机械分离、传热、蒸发、吸收、精馏、干燥等八章。每章由两部分组成，一是知识要点复习，二是典型例题分析。知识要点复习部分不是各章节知识点的简单罗列，而是将作者长期积累的教学经验、体会融合其中进行编写，对各章的重点、难点、学习线索进行分类归纳、整理总结，便于读者对各章主要知识点的复习记忆、加深理解，提高运用知识点去分析和解决问题的能力。典型例题分析部分主要围绕课程的重点、难点来选取题材，设计型与操作型题目并重，定量计算为主，兼顾定性分析。典型例题分析部分不是单纯的题目解答，而是在解答过程穿插分析，探索一题多解，引导一题多变，其中许多解题方法体现了作者独特的见解，是作者多年教学经验的结晶。作者力图通过典型例题的解答分析，使读者能够举一反三，触类旁通，达到训练解题思维、开拓解题思路、提高解题能力的目的。

第二篇各章都附有一定数量的习题供读者练习，习题后附有参考答案，便于读者自行检测。

第二篇的内容可与《化工原理》教材配套使用或作为教学参考书。主要读者对象是高等

院校化工类及相关专业本科、专科学生，考研、自学考试、成教专科及专升本考生。

本书由阮奇、叶长燊、黄诗煌编著。第2、4、5、7、10、11、13、14、15、16章由阮奇执笔，并负责全书统稿；第3、8、9、12和17章由叶长燊执笔；第1、6章由黄诗煌执笔。十分感谢：浙江大学谭天恩教授为本书作序；福州大学张济宇教授和王良恩教授对本书进行的精心审定和指导；福州大学沈斐敏教授、吴燕翔教授、陈建中教授和董声雄教授的热情支持、帮助和指导；福州大学“教学改革基金”和“学校教材出版基金”的资助；福州大学化工原理教研室李微、李玲、林晓勤、施小芳等老师为书稿的录入与校对所做的大量工作。

鉴于作者的水平及经验有限，书中不足和错误在所难免，欢迎广大读者和同行批评指正。

编者

2001年6月于福州大学

目 录

第 1 章 流体流动	1
1.1 流体流动知识要点	1
1.1.1 流体静力学基本方程	1
1.1.2 压力的单位与基准	1
1.1.3 压力测量	2
1.1.4 流体的速度、体积流量、质量流量及质量流速之间关系	4
1.1.5 稳定流动时的连续性方程	4
1.1.6 实际流体的柏努利方程	4
1.1.7 流体流过直管的摩擦阻力	5
1.1.8 摩擦系数	5
1.1.9 流体通过非圆形管的摩擦阻力	6
1.1.10 流体通过管件及阀门的摩擦阻力	6
1.1.11 流体输送机械消耗的功率	7
1.1.12 简单管路计算解题关系图	7
1.1.13 简单管路设计型问题题型及解法分析	7
1.1.14 简单管路操作型问题题型及解法分析	9
1.1.15 复杂管路计算	11
1.1.16 流量测量	12
1.2 流体流动典型例题分析	13
1.2.1 流体静力学	13
1.2.2 流体流动基本问题典型例题分析	15
1.2.3 简单管路计算典型例题分析	18
1.2.4 复杂管路计算典型例题分析	24
1.2.5 典型综合例题分析	29
习题	30
第 2 章 流体输送机械	35
2.1 流体输送机械知识要点	35
2.1.1 离心泵的主要性能参数	35
2.1.2 离心泵的特性曲线	36
2.1.3 影响离心泵特性的因素分析	36
2.1.4 离心泵的工作点与流量调节	37
2.1.5 离心泵工作点与流量调节的题型与解法分析	38
2.1.6 离心泵的组合操作	43
2.1.7 组合泵流量调节题型与解法分析	44
2.1.8 离心泵的安装高度	44
2.1.9 离心泵的选择	45
2.1.10 往复泵的性能参数、特性曲线与流量调节	45
2.1.11 离心通风机的性能参数、特性曲线与风机选择	47
2.2 流体输送机械典型例题分析	48

习题	54
第3章 过滤	56
3.1 过滤知识要点	56
3.1.1 过滤物料衡算题型及解法分析	56
3.1.2 过滤基本方程	58
3.1.3 恒压过滤	61
3.1.4 恒速过滤	62
3.1.5 先恒速(升压)后恒压过滤	63
3.1.6 洗涤速率	63
3.1.7 洗涤时间	64
3.1.8 过滤机的生产能力	65
3.1.9 间歇过滤机的最佳操作周期与最大生产能力	68
3.2 过滤典型例题分析	71
3.2.1 过滤计算题型与解法分析	71
3.2.2 过滤设计型计算典型例题	73
3.2.3 过滤操作型计算典型例题	74
习题	79
第4章 传热	82
4.1 传热知识要点	82
4.1.1 热传导知识要点	82
4.1.2 热传导题型与解法分析	83
4.1.3 对流传热知识要点	83
4.1.4 辐射传热知识要点	84
4.1.5 总传热速率方程	85
4.2 传热的几种计算方法及其比较	88
4.2.1 对数平均推动力法	88
4.2.2 消元法	89
4.2.3 传热效率 ϵ 与传热单元数 NTU 法	89
4.2.4 传热单元长度 H 与传热单元数 NTU 法	90
4.2.5 饱和蒸汽冷凝(有相变)加热冷流体(无相变)传热计算方法	92
4.3 热传导典型例题分析	93
4.4 辐射传热典型例题分析	94
4.5 换热器的设计型计算	96
4.5.1 设计型计算的命题方式	96
4.5.2 设计型问题的计算方法	96
4.5.3 设计型计算中参数的选择	96
4.5.4 设计型计算典型例题分析	97
4.6 换热器的操作型计算	102
4.6.1 操作型计算的命题方式	102
4.6.2 传热过程的调节	102
4.6.3 饱和蒸汽冷凝加热冷流体传热操作型问题解题关系图	103
4.6.4 饱和蒸汽冷凝加热冷流体第一类命题操作型问题题型及解法分析	104
4.6.5 饱和蒸汽冷凝加热冷流体第二类命题操作型问题题型及解法分析	108
4.6.6 饱和蒸汽冷凝加热冷流体换热器校核计算题型及解法分析	108

4.6.7	冷、热流体均无相变传热操作型问题解题关系图	109
4.6.8	冷、热流体均无相变传热操作型问题题型及解法分析	109
4.6.9	操作型计算典型例题分析	111
4.7	换热器操作型问题定性分析法	124
4.7.1	对数平均推动力法	124
4.7.2	传热单元长度 H 与传热单元数 NTU 法 (即 $H-NTU$ 法)	124
	习题	126
第5章	单效蒸发	130
5.1	单效蒸发知识要点	130
5.1.1	单效蒸发物料衡算	130
5.1.2	单效蒸发热量衡算	130
5.1.3	蒸发器总传热速率方程	131
5.1.4	蒸发汽液相平衡关系 (汽液温度关系)	131
5.1.5	单效蒸发计算解题关系图	133
5.1.6	单效蒸发设计型计算题型及解法分析	133
5.1.7	单效蒸发操作型计算题型及解法分析	134
5.2	单效蒸发典型例题分析	135
	习题	138
第6章	吸收	140
6.1	吸收知识要点	140
6.1.1	亨利定律	140
6.1.2	传质速率方程	140
6.1.3	吸收塔计算基本公式	142
6.1.4	吸收计算若干问题讨论	144
6.1.5	吸收与传热的联想比较	148
6.1.6	解吸塔计算	149
6.2	吸收与解吸设计型问题分析	151
6.2.1	吸收与解吸设计型计算命题	151
6.2.2	吸收与解吸塔设计型计算典型例题分析	152
6.3	吸收与解吸操作型问题分析	159
6.3.1	吸收与解吸操作型计算命题	159
6.3.2	吸收操作型计算解题关系图	159
6.3.3	吸收操作型计算题型及解法分析	160
6.3.4	与操作型问题类似的吸收设计型计算问题题型及解法分析	164
6.3.5	吸收与解吸操作型问题定性分析方法与典型例题	166
6.3.6	吸收与解吸操作型计算典型例题分析	170
	习题	180
第7章	精馏	183
7.1	精馏知识要点	183
7.1.1	二元理想溶液汽液平衡方程	183
7.1.2	全塔物料衡算关系与回收率的定义	183
7.1.3	操作线方程	184
7.1.4	q 线方程及进料热状况对 q 线 and 操作线的影响	188
7.1.5	回流比的影响及选择	190

007	7.1.6	提馏段操作线方程的一种简便求法	193
091	7.1.7	理论塔板数的求法	194
111	7.1.8	理论板的增浓度及液气比对理论板分离能力的影响	196
151	7.1.9	全塔效率与单板效率	196
151	7.1.10	直接蒸汽加热	197
151	7.1.11	复杂精馏塔	199
057	7.2	精馏计算典型例题分析	200
057		习题	217
	第8章	干燥	221
	8.1	干燥知识要点	221
064	8.1.1	湿空气性质	221
121	8.1.2	湿度图	222
121	8.1.3	干燥器的物料衡算	223
221	8.1.4	干燥系统的热量衡算	226
121	8.1.5	物料衡算与热量衡算的联立求解	227
121	8.1.6	理想干燥过程废气状态的确定及其图示	228
221	8.1.7	实际干燥过程废气状态的确定及其图示	230
221	8.1.8	干燥系统的热效率	232
121	8.1.9	湿物料中的水分性质	235
011	8.1.10	恒定干燥条件下的干燥速率与干燥时间	235
	8.2	干燥计算典型例题分析	240
067	8.2.1	湿空气性质定量计算与定性分析例题	240
241	8.2.2	干燥物料衡算与热量衡算解题关系图	242
141	8.2.3	干燥物料衡算与热量衡算题型及解法分析	242
211	8.2.4	干燥物料衡算与热量衡算例题	247
411	8.2.5	干燥时间计算问题解题关系图	251
121	8.2.6	干燥时间计算问题题型及解法分析	251
121	8.2.7	干燥时间计算例题	252
57		习题	254
	参考文献		257
071			
111			
181			
221			
251			
281			
311			
341			
371			
401			
431			
461			
491			
521			
551			
581			
611			
641			
671			
701			
731			
761			
791			
821			
851			
881			
911			
941			
971			

第1章 流体流动

1.1 流体流动知识要点

1.1.1 流体静力学基本方程

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad \text{或} \quad gz + \frac{p}{\rho} = \text{常数} \quad (1-1)$$

或
$$p = p_0 + \rho gh \quad (1-2)$$

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

z_1, z_2 ——分别为截面 1-1' 和 2-2' 距基准水平面的垂直距离, m ;

p_1, p_2 ——分别为截面 1-1' 和 2-2' 的压力, Pa ;

p, p_0 ——分别为 h 处液体和液面上方的压力, Pa ;

h ——距液面的高度, m 。

流体静力学基本方程, 适用于重力场中静止不可压缩流体 (即液体)。应用流体静力学基本方程解题时应特别注意以下几个概念。

(1) 静力学基本方程的物理意义 由式(1-1)可知, 各项 (gz 项和 p/ρ 项) 单位均为 J/kg 。其中, gz 项是单位质量流体所具有的位能, 而 p/ρ 是单位质量流体所具有的静压能, 二者都是势能。可见, 连续静止流体中, 有两种形式势能——位能和静压能。流体内部各点位能或静压能可能不相等, 但二者可以互相转换 (位能可以转换为静压能, 静压能亦可以转换为位能), 其总和保持不变 (机械能守恒原理), 这就是静力学基本方程的物理意义。

(2) 压力大小可以用流体柱高度表示 由式(1-2)可知, 当液面上方为绝对真空时, 即 $p_0=0, p=\rho gh$ 。说明压力大小可以用流体柱高度表示, 但必须注明流体柱的名称, 如 760mmHg 、 $10\text{mH}_2\text{O}$ 等。根据 $p=\rho gh$, 可将流体柱高度换算成 SI 制单位表示的压力大小, 如 760mmHg 相当于 $p=13600 \times 9.81 \times 0.76\text{N}/\text{m}^2 = 1.013 \times 10^5\text{N}/\text{m}^2$ (或 Pa) $=101.3\text{kPa}$ 。

(3) 等压面的概念 式(1-2)是根据静止的、连续的同一种液体柱导出的, 所以式中 ρ 为常数, 在液体内部同一水平面上的各点 h 为常数, 则 p 相等, 将压力相等的水平面称为等压面。必须注意等压面必须同时满足静止的、连续的同一种流体、处于同一水平面这三个条件, 缺一不可。

静力学基本方程是以液体为例导出的, 液体是不可压缩流体, ρ 与压力无关仅与温度有关。而气体是可压缩流体, 其 ρ 除随温度变化外还随压力变化 (即随 h 而变), 但在一般情况下这种变化可以忽略, 静力学基本方程对气体在一般情况仍然适用。

1.1.2 压力的单位与基准

流体的压力 p 是一个重要的物理量, 在解题时要特别注意以下两个问题。

(1) 压力的单位与换算 压力 p 的法定计量单位为 N/m^2 (SI 制), 也称为帕斯卡 (Pa)。以前曾用非法定计量单位 (被废除) 如 kgf/cm^2 、 bar (巴)、 mmHg 、 mmH_2O 、大气压作压力单位。若题目已知条件给定的压力单位是非法定计量单位, 解题时均应将其换算成法定计量单位 (SI 制), 因此必须熟悉各压力单位之间的换算关系, 即

$$1\text{atm(标准大气压)}=1.013\text{bar}=1.013\times 10^5\text{Pa}=101.3\text{kPa}=0.1013\text{MPa}$$

$$=760\text{mmHg}=10.33\text{mH}_2\text{O}=1.033\text{kgf/cm}^2$$

$$1\text{at(工程大气压)}=0.9807\text{bar}=9.807\times 10^4\text{Pa}=735.6\text{mmHg}=10\text{mH}_2\text{O}=1\text{kgf/cm}^2$$

(2) 压力的基准 从流体静力学基本方程可知, 位置和静压力都是以差值出现的。因此, 为了方便, 位置和静压力都可以任选一个基准作为量度的起点。常用的压力的基准有两个, 一个是绝对真空, 另一个是大气压力 (简称大气压)。以绝对真空为基准量得到的压力称为绝对压力 (简称绝压) p_{ab} , 以大气压 p_a 作为基准量得到的压力称为表压力 (简称表压) p_m 。图 1-1 表示了绝对压力 p_{ab} 、表压 p_m 和真空度 p_{vac} 三者的关系。

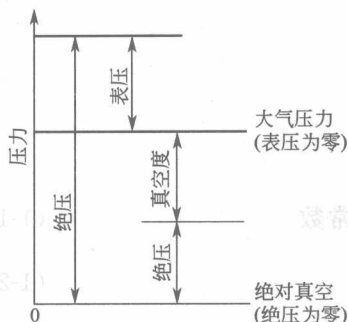


图 1-1 压力基准和量度

① 当被测流体的压力大于当时当地的大气压力 p_a 时, 所用的测压表称为压力表。压力表上的读数表示被测流体的绝对压力 p_{ab} 比 p_a 高出的数值, 称为表压 p_m , 它们之间的关系为:

$$p_m = p_{ab} - p_a \quad (1-3)$$

② 当被测流体的压力小于 p_a 时, 所用的测压表称为真空表。真空表上的读数表示被测流体的绝对压力 p_{ab} 低于 p_a 的数值, 称为真空度 p_{vac} , 它们之间的关系为:

$$p_{vac} = p_a - p_{ab} \quad (1-4)$$

比较式(1-3)和式(1-4)可知 p_m 与 p_{vac} 之间的关系为

$$p_{vac} = -p_m \quad (1-5)$$

1.1.3 压力测量

化工中测量压力的装置或仪表很多, 如前述的压力表、真空表。下面再简要介绍与流体静力学原理有关的测压装置。

1.1.3.1 U形测压管

(1) 用 U 形测压管测流体的表压 若测量设备或管路中流体的压力大于大气压力, 可采用 U 形测压管测流体的表压, 其测量装置如图 1-2 所示。U 形管内指示液必须与被测流体不互溶, 其密度 ρ_i 必须大于被测流体密度 ρ 。常用的指示液有水、汞、四氯化碳等。根据等压面的概念可知, 图 1-2 中 1-2 平面为等压面, 由 $p_1 = p_2$ 可得

$$p_m = p - p_a = \rho_i gR - \rho gh + \rho_a g(h - R)$$

由于空气密度 ρ_a 很小, $(h - R)$ 项也很小, 故 $\rho_a g(h - R)$ 项可略去, 得

$$p_m = p - p_a = \rho_i gR - \rho gh \quad (1-6)$$

式中 p , p_m ——分别为被测流体的绝对压力和表压, Pa;

p_a ——当时当地大气压力, Pa;

ρ , ρ_i ——分别为被测流体和指示液密度, kg/m^3 ;

R ——U 形测压管指示液读数, m;

h ——U 形测压管指示液液面低的一端距测压口的垂直距离, m。

从式(1-6)可知, 用 U 形测压管进行测量时, 应记住, 在读取 R 时, 必须同时读取 h 值。但若被测流体为气体, 由于气体 ρ 很小, 式(1-6)中 ρgh 项可略去, 则 $p_m \approx \rho_i gR$, 此时不必读取 h 值。

(2) 用 U 形测压管测流体的真空度 若容器中被测流体的绝压低于大气压力, 此时用

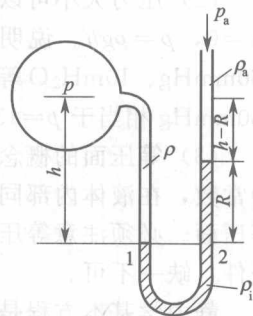


图 1-2 U 形测压管表压测量装置

U形测压管可测得流体的真空度。请读者延伸考虑此时测压管两端液面的情况和真空度的计算式。

1.1.3.2 U形压差计

若将U形测压管的两端分别与两个取压口相连接,则可测得两点的压差或虚拟压力差,该装置称为U形压差计。

(1) 用U形压差计测两截面间的虚拟压力差 若两个测压口不在等高面上;如图1-3所示,图中3-4面为等压面,由 $p_3 = p_4$ 可得

$$(p_1 + \rho g z_1) - (p_2 + \rho g z_2) = (\rho_1 - \rho) g R \quad (1-7)$$

由于 $\rho g z$ 项是压力单位,故 $(p + \rho g z)$ 项可称为虚拟的压力。所以,当管道倾斜或垂直放置,即两个测压口不在等高面上时,U形压差计测出的是两截面间流体的虚拟压力差。

(2) 用U形测压管测两截面间的压力差 当管道水平放置,两测压口在等高面上,即 $z_1 = z_2$,式(1-7)简化为

$$p_1 - p_2 = (\rho_1 - \rho) g R \quad (1-8)$$

此时,U形压差计测出的是两截面间流体的压力差。若被测流体为气体, $\rho_1 \gg \rho$,式(1-8)进一步简化为 $p_1 - p_2 \approx \rho_1 g R$ 。

1.1.3.3 微差压力计(双液体U形压差计)

若两截面的压差 $\Delta p = p_1 - p_2$ 值很小,根据式(1-8),普通U形压差计的读数 R 也很小,难以准确读出 R 值,为了提高读数精度,除了选用 ρ_1 尽可能与 ρ 接近的液体作指示液外,还可用双液体U形压差计(装有两种不互溶且密度相近的液体作指示液,又称微差压力计),如图1-4所示。

当压力计两端与压力分别为 p_1 和 p_2 的两个取压口相连接而测取压差时,U形管两端上方扩大室的截面比U形管截面大得多,U形管中指示液的读数变化对两个扩大室中的液面影响不会很大,图1-4中3-4面为等压面,可以导出

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_C) g R \quad (1-9)$$

由于两种指示液的密度 ρ_A 和 ρ_C 非常接近,可使读数 R 放大几倍或更大。图1-4中 ρ 为

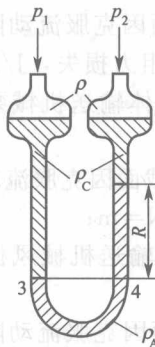


图1-4 微差压差计

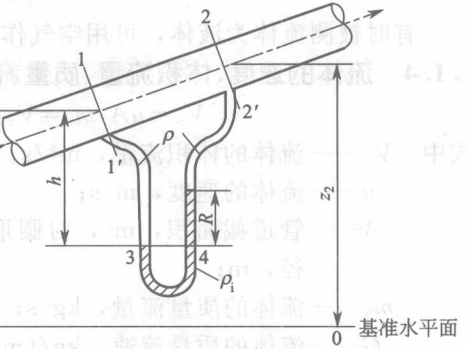


图1-3 U形压差计

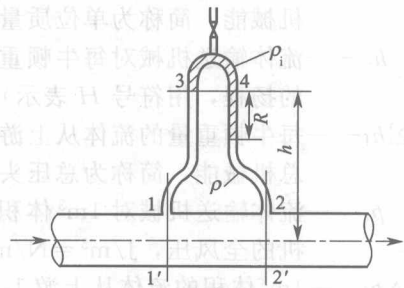


图1-5 倒U形压差计

被测流体密度。

1.1.3.4 倒 U 形压差计

如果指示液的密度 ρ_1 小于被测流体的密度 ρ , 则必须用倒 U 形管压差计, 如图 1-5 所示。图中 3-4 面为等压面, 同理可导出

$$p_1 - p_2 = (\rho - \rho_1)gR \quad (1-10)$$

有时被测流体为液体, 可用空气作指示剂, 则 $\rho_1 \ll \rho$, $p_1 - p_2 \approx \rho gR$ 。

1.1.4 流体的速度、体积流量、质量流量及质量流速之间关系

$$V_s = uA, m_s = V_s \rho = uA\rho, G = m_s/A = V_s \rho/A = u\rho \quad (1-11)$$

式中 V_s ——流体的体积流量, m^3/s ;

u ——流体的速度, m/s ;

A ——管道截面积, m^2 , 对圆形截面管道 $A = \pi d^2/4 = 0.785d^2$, 其中, d 为管道内径, m ;

m_s ——流体的质量流量, kg/s ;

G ——流体的质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

由于气体体积随温度 T 、压力 p 而变, 所以气体流速 u 亦随 T 、 p 变化。因此, 对于气体在管内流动的计算, 采用不随气体状态 (T 、 p) 变化的质量流速 G 计算较为方便。

1.1.5 稳定流动时的连续性方程

$$u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2 = \dots = uA\rho = m_s = \text{常数} \quad (1-12)$$

对不可压缩流体 (液体), ρ 为常数, 有

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 = \dots = uA = V_s = \text{常数} \quad (1-13)$$

1.1.6 实际流体的柏努利方程

实际流体在流动时存在流动阻力, 为了克服流动阻力必须消耗掉一部分机械能。克服流动阻力而消耗掉的机械能因衡算基准不同习惯上分别称为阻力损失 $\sum w_f$, J/kg ; 压头损失 $\sum h_f$, m ; 压力降 $\sum \Delta p_f$, Pa 。导出柏努利方程的衡算基准有单位质量流体、单位重量流体、单位体积流体三种衡算基准, 与这三种衡算基准对应的实际流体柏努利方程分别为

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + w_e = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum w_f \quad (\text{J}/\text{kg}) \quad (1-14)$$

和
$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + h_e = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum h_f \quad (\text{m}) \quad (1-15)$$

及
$$\rho g z_1 + p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + p_t = \rho g z_2 + p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + \sum \Delta p_f \quad (\text{N}/\text{m}^2) \quad (1-16)$$

式中 w_e ——流体输送机械对 1kg 质量的流体所做的功, J/kg ;

$\sum w_f$ —— 1kg 质量的流体从上游 1-1' 截面流到下游 2-2' 截面因克服流动阻力而消耗的总机械能, 简称为单位质量流体总机械能损失或总阻力损失, J/kg ;

h_e ——流体输送机械对每牛顿重量流体所做的功 (在液体输送机械泵一节中称为泵的扬程, 用符号 H 表示) $\text{J}/\text{N} = \text{m}$;

$\sum h_f$ ——每牛顿重量的流体从上游 1-1' 截面流到下游 2-2' 截面因克服流动阻力而消耗的总机械能, 简称为总压头损失或总阻力损失, $\text{J}/\text{N} = \text{m}$;

p_t ——流体输送机械对 1m^3 体积流体所做的功, 在气体输送机械风机一节中称为风机的全风压, $\text{J}/\text{m}^3 = \text{N}/\text{m}^2 = \text{Pa}$;

$\sum \Delta p_f$ —— 1m^3 体积的流体从上游 1-1' 截面流到下游 2-2' 截面因克服流动阻力而消耗的总机械能, 简称为总压力降或总阻力损失, $\text{J}/\text{m}^3 = \text{N}/\text{m}^2 = \text{Pa}$ 。

式(1-14)~式(1-16)中其他符号意义同前。

流体在管路中的流动阻力分为两类，一类是直管阻力 (w_f 、 h_f 和 Δp_f)，另一类是局部阻力 (w'_f 、 h'_f 和 $\Delta p'_f$)，总阻力为直管阻力与各种局部阻力之和。

1.1.7 流体流过直管的摩擦阻力

与三种衡算基准的柏努利方程相对应，流体流过直管的摩擦阻力也有三种表达形式，它们可用下面的范宁公式计算：

$$w_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2}, h_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2g}, \Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{\rho u^2}{2} \quad (1-17)$$

式中 w_f ——单位质量流体在直管中的机械能损失，J/kg；

h_f ——直管压头损失，m；

Δp_f ——直管压力降，Pa；

λ ——摩擦系数，无量纲；

l ——直管总长，m；

d ——管内径，m。

用范宁公式即式(1-17)求直管的摩擦阻力的关键是摩擦系数 λ 如何确定。

1.1.8 摩擦系数

(1) 层流摩擦系数 摩擦系数 λ 与流型有关，流型可用雷诺数 Re 判别。当雷诺数 $Re \leq 2000$ 时，流体在管内作层流流动，其摩擦系数 λ 仅与 Re 有关，即

$$\lambda = 64/Re \quad (1-18)$$

$$Re = du\rho/\mu \quad (1-19)$$

式中 μ ——流体黏度， $N \cdot s/m^2$ ，即 $Pa \cdot s$ 。若题给 μ 为物理单位制的泊 (P) 或厘泊 (cP)，解题时需换算成国际单位制，其换算关系为

$$1Pa \cdot s = 10P = 1000cP$$

将式(1-18)代入式(1-17)的 Δp_f 表达式中，可得泊谟叶方程

$$\Delta p_f = \frac{32\mu lu}{d^2} \quad (1-20)$$

式(1-20)说明层流时的压力降 (阻力损失) 与流速的一次方成正比。

对于等径 ($u_1 = u_2$) 及无外功 ($p_t = 0$) 的直管 ($\sum \Delta p_f = \Delta p_f$)，由式(1-16)结合式(1-20)可得

$$\Delta p_f = (p_1 + \rho g z_1) - (p_2 + \rho g z_2) = 32\mu lu/d^2 \quad (1-20a)$$

对于水平、等径、无外功的直管，式(1-20a)中的 $z_1 = z_2$ 。

(2) 湍流摩擦系数 当雷诺数 $Re \geq 4000$ 时，流体在管内作湍流流动，其摩擦系数与 Re 和管壁相对粗糙度 ϵ/d 都有关系，Colebrook 方程是得到工程界普遍认可、适用范围广 ($Re = 4 \times 10^3 \sim 10^8$)、精度高的关于 λ 与 Re 及 ϵ/d 之间关系的方程，但该方程是隐式方程，计算摩擦系数要用迭代或试差的方法求解，很不方便。Moody 把 Colebrook 方程绘制成摩擦系数图，该图直观明了，但查图数据误差大，且不能用于计算机编程求解。为了克服这些缺点，许多研究者提出了各种形式的摩擦系数显式方程，这些方程有着形式简单但误差高、精度高但形式复杂等缺点，笔者将 Colebrook 方程解的结果用智能拟合法拟合成式(1-21)：

$$\lambda = 0.1176 \left(\frac{\epsilon}{d} + \frac{73.89}{Re} \right)^{0.306} + 0.4034 \frac{\epsilon}{d} + 0.005 \quad (1-21)$$

式中 ϵ ——管壁的绝对粗糙度，m。

式(1-21)形式简单、精度高 (Moody 图的上述范围的平均误差为 0.5%，最大误差小于 2%)、适用范围广 [Moody 摩擦系数图的整个范围 $3 \times 10^3 \leq Re \leq 1 \times 10^8$ ，包括湍流区、完全湍流区、光滑管区 ($\epsilon/d = 0$)，适用相对粗糙度范围为： $0 \leq \epsilon/d \leq 0.05$]，是计算管内湍

流体的摩擦系数的显式新方程, 使用方便。对于光滑管可令式中 $\epsilon/d=0$; 对于完全湍流区, Re 对 λ 影响可以忽略, 式中 $73.89/Re$ 项可略去。

当流体在光滑管 ($\epsilon \approx 0$) 内流过且 $Re=3 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ 时, 还可以用如下的柏拉修斯公式计算 λ

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (1-22)$$

将柏拉修斯公式代入范宁公式可得出光滑管内湍流流动阻力损失与流速的 1.75 次方成正比。

1.1.9 流体通过非圆形管的摩擦阻力

当流体流动为湍流时, 仍可用范宁公式计算非圆形管的摩擦阻力, 但应将式(1-17)及 Re 中和相对粗糙度 ϵ/d 中的圆管直径 d 改用当量直径 d_e 代替, 当量直径的定义如下

$$d_e = 4 \times \frac{\text{流通截面积}}{\text{润湿周边长}}$$

如套管环隙的当量直径
$$d_e = 4 \times \frac{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)}{\pi(D+d)} = D - d$$

式中 D ——外管的内径, m;

d ——内管的外径, m。

当流动为层流时, 此种方法计算误差较大, 还须修正, 即要改变式(1-18)中的常数, 如正方形管要将 64 改为 57, 环形截面(套管环隙)则将 64 改为 96 等。

需要注意的是, 用 d_e 计算 Re 判断非圆形管内的流型, 其临界值仍为 2000; 不能用 d_e 去计算非圆形管的截面积、流速和流量, 如套管环隙的流速

$$u = \frac{V_s}{0.785(D^2 - d^2)} \neq \frac{V_s}{0.785d_e^2} = \frac{V_s}{0.785(D-d)^2}$$

1.1.10 流体通过管件及阀门的摩擦阻力

(1) 当量长度法 这种方法是把局部阻力折合成相当于一定长度 l_e 的直管阻力, 即可采用直管阻力公式计算局部阻力, 即:

$$w'_i = \lambda \frac{l_e}{d} \times \frac{u^2}{2}, h'_i = \lambda \frac{l_e}{d} \times \frac{u^2}{2g}, \Delta p'_i = \lambda \frac{l_e}{d} \times \frac{\rho u^2}{2} \quad (1-23)$$

式中 $w'_i, h'_i, \Delta p'_i$ ——均简称为局部阻力, 它们的单位分别为 J/kg、m、Pa;

l_e ——管件与阀门的当量长度, m。

(2) 局部阻力系数法 这种方法是把局部阻力表示为流体动压头的倍数, 即:

$$w'_i = \zeta \frac{u^2}{2}, h'_i = \zeta \frac{u^2}{2g}, \Delta p'_i = \zeta \frac{\rho u^2}{2} \quad (1-24)$$

式中 ζ ——局部阻力系数, 无量纲。

由于各种管件、阀门的构造与尺寸千差万别, 在不同的资料中, $\zeta, l_e/d$ 的数值可能差别很大, 同一种局部阻力用两种不同方法计算所得结果不一定相同。所以, 局部阻力的计算只能是一种估算。

柏努利方程中的 $\sum w_f, \sum h_f, \sum \Delta p_f$ 为管路的总阻力, 总阻力为直管阻力与各种局部阻力之和, 如 $\sum w_f = w_f + \sum w'_i$ 。在实际计算过程, 局部阻力可用当量长度法、局部阻力系数法、当量长度法与局部阻力系数法相结合等三种方法计算, 相应地, 总阻力的计算也有三种方法, 即

$$\sum w_f = \lambda \frac{l + \sum l_e}{d} \times \frac{u^2}{2} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2} = \left(\lambda \frac{l + \sum l_e}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (1-25)$$