

高等院校“十一五”规划教材

化工原理实验

郑秋霞 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高等院校“十一五”规划教材

化工原理实验

郑秋霞 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是《化工原理》及其相关课程的配套教材,注重培养学生综合素质,通过实验操作使学生掌握化工生产的基本操作技能。其内容包括两个部分:第一部分为化工原理实验基础知识,主要介绍实验数据的测量、分析及处理方法以及实验操作技能与实验异常现象的分析、处理方法。第二部分为实验内容,主要介绍化工原理演示、验证性实验与综合、设计性实验的实验装置及操作流程。

本书可作为高等院校本科、专科的化工原理实验教材,也可供化学工程、环境工程、食品工程和生物化工等专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/郑秋霞主编. —北京:中国石化出版社,
2007

ISBN 978 - 7 - 80229 - 426 - 4

I. 化… II. 郑… III. 化工原理 - 实验 IV. TQ02 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 141910 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

金圣才文化(北京)发展有限公司排版

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 6.5 印张 153 千字

2007 年 10 月第 1 版 2007 年 10 月第 1 次印刷

定价:15.00 元

前 言

化工原理课程是自然科学领域的基础课向工程科学的专业课过渡的入门课程，是化工及其相关专业学生必修的一门重要的技术基础课。化工原理实验课程是化工原理课程的重要组成部分，是培养学生工程观念和实际能力、提高学生综合素质的重要途径。

本书是《化工原理》及其相关课程的配套教材，其内容包括两部分，第一部分为化工原理实验基础知识，主要介绍化工原理实验概要、化工实验参数测量、实验数据误差分析、实验数据的处理方法以及操作基本技能。第二部分为实验内容，包括化工原理各主要单元操作的实验项目，重点介绍了雷诺实验、流体流动能量转换实验、流体流动阻力测定实验、离心风机性能测定实验、过滤实验、气-汽传热实验、对流传热系数与导热系数的测定实验、萃取实验、洞道干燥实验、填料塔吸收综合实验、筛板塔精馏设计实验等 14 个实验项目的实验原理和实验操作方法。

本书全面介绍了化工原理各单元操作的实验过程，并结合综合性、设计性实验强化学生的创新意识。在本书的编写过程中，我们吸收了大量的实际生产操作经验及实验教学经验，加入了实验操作基本技能、实验故障的处理方法及安全基本知识等内容，注重化工原理实验教学过程中学生分析问题和解决问题能力的强化训练，力求在内容和体系上有新意，同时也为从事化工生产操作的人员提供一定的技术参考。

本书由广东省茂名学院化工原理教学与实验中心郑秋霞主编，并编写第四章、第五章、第六章，童汉清编写第一章、第七章，梅树莲编写第二章，吴景雄编写第三章。全书由梁朝林教授主审。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，衷心希望专家、读者提出宝贵意见，以便修改与完善。

编 者

2007 年 8 月

目 录

第一篇 化工原理实验基础知识

第1章 化工原理实验概要	(3)
1.1 化工原理实验特点	(3)
1.2 实验教学目的	(3)
1.3 实验教学内容	(3)
1.4 实验教学的基本要求	(3)
第2章 化工实验参数测量	(5)
2.1 流体压力的测量	(5)
2.2 流量的测量	(7)
2.3 温度的测量	(10)
第3章 实验数据误差分析	(12)
3.1 数据的真值和平均值	(12)
3.2 误差分析	(13)
3.3 误差的表示方法	(13)
3.4 错误数据的剔除	(15)
3.5 精密度、正确度和准确度(精确度)	(15)
3.6 有效数据	(15)
第4章 实验数据的处理方法	(19)
4.1 实验数据列表法	(19)
4.2 实验数据图示法	(20)
4.3 实验数据函数式	(22)
第5章 基本操作技能	(25)
5.1 化工单元设备基本操作技能	(25)
5.2 仪器设备的使用	(30)
5.3 实验异常现象、原因及处理方法	(32)
5.4 实验安全基本知识	(33)

第二篇 实 验 内 容

第6章 验证、演示实验	(39)
6.1 雷诺演示实验	(39)
6.2 流体流动能量转换实验	(41)
6.3 流体流动阻力测定实验	(44)
6.4 离心风机性能测定实验	(47)

6.5	过滤实验	(51)
6.6	气-汽对流传热实验	(55)
6.7	对流传热系数与导热系数测定实验	(59)
6.8	筛板塔精馏实验	(64)
6.9	板式塔演示实验	(68)
6.10	萃取实验	(70)
6.11	洞道干燥实验	(75)
第7章	综合性实验与设计性实验	(80)
7.1	离心泵综合实验	(80)
7.2	填料塔吸收综合实验	(84)
7.3	筛板塔精馏设计实验	(90)
附录一	空气的重要物理性质	(95)
附录二	水的重要物理性质	(95)
附录三	乙醇-水在常压下气液相平衡数据	(96)
附录四	乙醇-正丙醇在常压下气液相平衡数据	(96)
附录五	乙醇定压比热容及汽化潜热表	(96)
附录六	正丙醇定压比热容及汽化潜热表	(96)
附录七	苯甲酸-煤油-水物系萃取实验分配曲线数据	(97)
附录八	$\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}$ 物系相平衡常数 m 与温度 t 之间关系	(97)
参考文献		(98)

第一篇 化工原理实验 基础知识

第1章 化工原理实验概要

1.1 化工原理实验特点

化工原理实验是一门实践性较强的技术基础课,它属于工程实验范畴,不同于基础实验。基础实验面向基础科学,处理的对象简单、甚至是理想的,实验方法理论、严密。而工程实验面对的是错综复杂的工程问题,实验涉及的物料千变万化,设备形式大小悬殊,由实验研究结果能从小见大,可应用于化工生产单元设备的设计及单元过程操作条件的确定。因此,不能将一般的物理实验或化学实验的方法套用于化工原理实验。

化工原理实验能培养学生的动手能力,使学生掌握化工生产的基本操作技能并学会理论联系实际,解决化工单元设备的实际问题。

1.2 实验教学目的

- ① 使学生巩固和强化化工原理知识的认识和理解。
- ② 培养学生的动手能力,使学生熟练掌握化工生产典型设备的操作技能。
- ③ 培养学生良好的操作习惯。

1.3 实验教学内容

化工原理实验课程内容包括:实验的基本知识、实验仿真(考虑到通用性及已有这方面的专著,该部分内容本书没编纳)和实验内容。实验基本知识主要讲授实验参数的测量、实验数据的误差与分析、实验数据(含有效数字)的处理、实验的基本操作技能等,实验内容详见本书第二篇。

1.4 实验教学的基本要求

- ① 熟悉化工数据的基本测试技术,例如温度、压力、流量。
- ② 学会组织实验,以测试到必要的参数,如设备特性参数的测定(阻力系数、传热系数、传质系数、过滤常数等)。
- ③ 掌握影响生产过程的操作参数,并懂得调节控制。
- ④ 掌握实验数据的处理方法(列表法、图示法、图解法)。
- ⑤ 实验预习:实验前学生必须认真阅读实验指导书,弄清实验目的、实验原理,根据实验的具体要求,讨论实验内容、步骤及应测数据,分析实验数据的测定方法,并预测实验数据的变化规律。结合实验任务到实验室现场认真查看实验流程、设备结构及仪表的种类,了解实验操作过程和操作的注意事项,经过充分的预习,写出实验预习报告,方可进行

实验。

⑥ 提交实验报告：实验报告是实验工作的全面总结和概括，它包括实验目的、实验原理、装置流程、操作方法和注意事项，还包括原始数据记录、数据处理、列表和作图、数据计算过程举例以及对实验结果进行分析讨论并作出结论。通过书写实验报告，使学生在实验数据的处理、作图、误差分析、问题归纳等方面得到全面提高。实验报告是实验者个人理解的再创造过程，而不是实验教科书的翻版，每一名实验者都应认真对待，独立完成。

第2章 化工实验参数测量

流体压力、流量、温度是化工生产与科学实验中的主要测量参数，是分析生产、科学实验操作过程的重要信息。而对这些参数的正确测量和控制，直接关系到产品质量或实验的研究结果。因此，本章着重介绍上述参数的测量。

2.1 流体压力的测量

流体压力测量可分成流体静压测量和流体总压测量。压力的表示方法可根据测量压力的基准不同分为两种。以绝对零压为基准的称为绝对压强，简称为绝压，是流体的真实压强。以大气压为基准可表示为表压强或真空度。如图2-1所示。

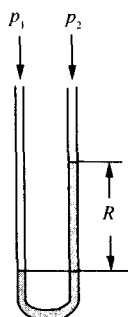
在化工生产和实验过程中所测压力的范围很广，要求的精度也各不相同，所以使用的压力测量仪表的种类也很多。下面简要介绍常用的液柱式压差计和弹簧管压强计。

2.1.1 液柱式压差计

液柱式压差计是根据流体静力学原理，把被测压差转换成液柱高度。这种压差计结构比较简单，精密度较高。既可用于测量流体的压力，又可用于测量流体的压差。液柱式压差计的基本形式有U形压差计、倒U形压差计、单管式压差计、斜管压差计、U形管双指示液柱压差计等。但是，这种压差计测量范围小，不耐高温。

(1) U形压差计

这是一种最常见的压差计，它是一根弯制而成的U形玻璃管，也可用两支玻璃管做成连通器形式。玻璃管内充入水、水银或其他液体为指示液。



在使用前指示液面处于同一水平，当作用于U形压差计两端的压力不同时，管内一边液柱下降，而另一边则上升，直至达到新平衡状态。这时两个液面存在着一定的高度差 R ，如图2-2所示。

若被测介质是液体，平衡时压差为：

$$p_1 - p_2 = (\rho' - \rho)gR \quad (2-1)$$

若被测介质是气体，由于 $\rho' \gg \rho$ ，压差可表示为：

$$p_1 - p_2 = \rho'gR \quad (2-2)$$

图2-2 U形管压差计 式中 ρ' ——指示液体的密度， kg/m^3 ；
 ρ ——被测流体的密度， kg/m^3 。

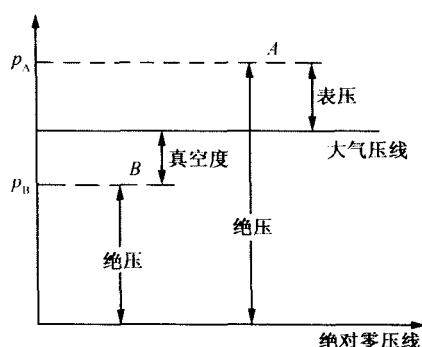


图2-1 绝压、表压、真空度关系

(2) 倒 U 形管压差计

倒 U 形管压差计的优点是玻璃管内不需充入指示液而是以待测流体为指示液。使用前以待测流体赶净测压系统空气，待倒 U 形管充满待测流体后调节倒 U 形管上部为空气，这种压差计一般用于测量液体压差较小的场合。如果与倒 U 形管两端相通的待测流体的压力不同，则在倒 U 形管的两根支管中待测流体上升的液柱高度也不同，如图 2-3 所示，其压差为：

$$p_1 - p_2 = (\rho - \rho_{\text{空}})gR \approx \rho gR \quad (2-3)$$

(3) 单管压差计

单管式压差计是用一只杯形容器代替 U 形压差计中的一根管子，如图 2-4 所示。由于杯的截面远大于玻璃管的截面，所以在其两端不同压强作用下，细管一边的液柱从平衡位置升高 h_1 ，杯形一边下降 h_2 。根据等体积的原理， $h_1 \gg h_2$ ，故 h_2 可忽略不计，在读数时只要读一边液柱高度即可。

$$\Delta p = h_1 \rho g \quad (2-4)$$

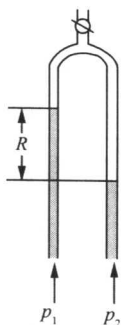


图 2-3 倒 U 形管压差计

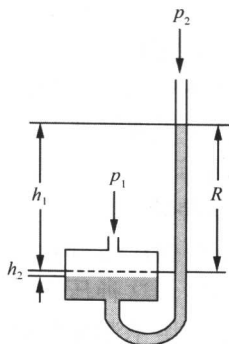


图 2-4 单管式压差计

2.1.2 弹簧管压强计

弹簧管压强计是根据弹性元件受压后产生弹性变形的原理制成的，其结构如图 2-5 所示

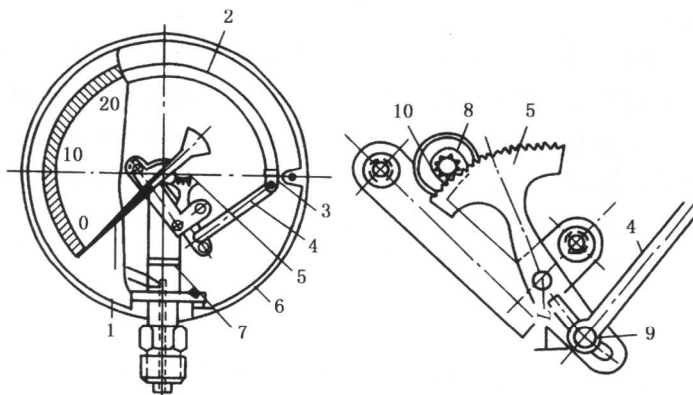


图 2-5 弹簧压强计

- 1—指针；2—弹簧管；3—接头；4—拉杆；5—扇形齿轮；
6—壳体；7—基座；8—齿轮；9—铰链；10—游丝

示。这是目前生产及实验室中常用的一种压强计，其表面小圆圈中的数字代表测量表的精度，数值越小其精度越高，一般常用 1.5 级或 1 级，测量精度要求较高的可用 0.4 级以上的表。

2.1.3 测压点的选择

测压点应选择在受流体流动干扰最小的地方，如在管路上测压，测压点应选在离流体上游的弯头、阀门或其他障碍物 40~50 倍管内径的距离，使紊乱的流线经过该稳定段后在靠近壁面处的流线与管壁面平行，从而避免了动能对测量的影响。若条件所限，可设置整流板或整流管，以消除动能的影响。

2.2 流量的测量

流量的测量和控制化工生产与实验中是必不可少的。流量是指单位时间内流体流过管截面的量。若流量以体积表示，称为体积流量 V ，以质量表示，称为质量流量 w 。它们之间的关系为：

$$w = \rho V \quad (2-5)$$

式中 ρ ——被测流体的密度， kg/m^3 。

被测流体的密度是随流体的状态而变。因此，以体积流量描述时，必须同时指明被测流体的压强和温度。

流量测量的方法很多，目前实验室所用的流量计主要有测速管、孔板流量计、文丘里流量计、转子流量计、涡轮流量计等。

2.2.1 测速管

测速管又称毕托管，如图 2-6 所示。它是由两根弯成直角的同心套管所组成，外管的管口是封闭的，在外管前端壁面四周开有若干测压小孔，测量时，测速管可以放在管截面任一位置上，并使管口正对管道中流体的流动方向，外管与内管的末端分别与液柱压差计的两臂相连接。

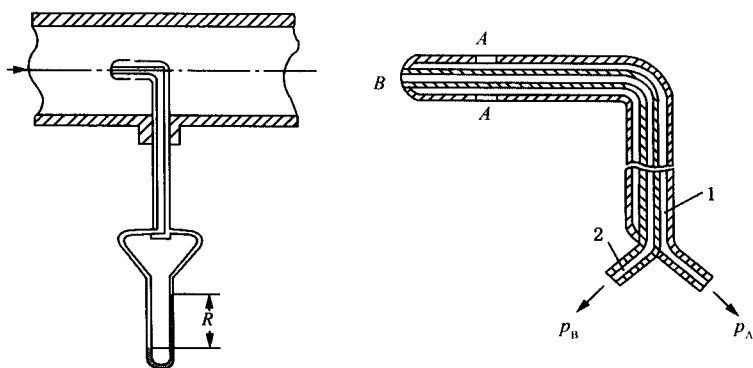


图 2-6 测速管

1—静压力导压管；2—总压力导压管

测速管只能测出流体在管道截面上某一点处的局部流速，要想得到管截面上的平均流速，可将测速管口置于管道的中心位置，测出流体的最大流速 $u_{\max}$ ，根据最大流速 $u_{\max}$ 计算

出雷诺数 $Re_{\max}$ ，然后利用图 2-7，计算出管截面的平均流速 u 。

$$u_{\max} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (2-6)$$

$$Re_{\max} = \frac{du_{\max}\rho}{\mu} \quad (2-7)$$

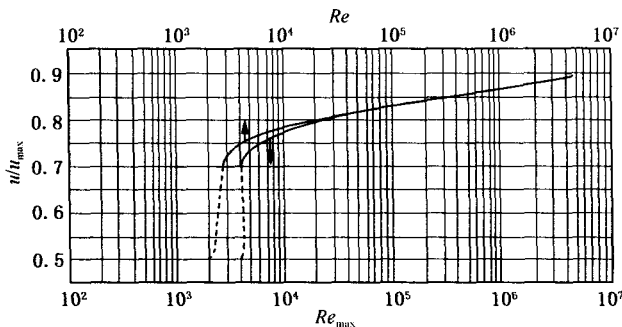


图 2-7 $u/u_{\max}$ 与 Re 、 $Re_{\max}$ 的关系

测速管的优点是对流体的阻力小，适用于测量大直径管路中的气体流速，但它不能直接测出平均流速。当流体含有固体杂质时，容易堵塞测压孔，因此，气体含有固体杂质时，不宜采用测速管。

2.2.2 孔板流量计

孔板流量计(如图 2-8 所示)是基于流体的动能和静压能相互转化的原理设计的，是以孔板作为节流元件的节流式流量计。孔板流量计结构简单，制造成本低，使用方便，可用于高温、高压等场合，但流体流经孔板时能量损耗较大，不能用于含固体颗粒或带有腐蚀性的介质，否则会造成孔口磨损或腐蚀。

2.2.3 文丘里流量计

文丘里流量计具有能量损失小的特点，但是文丘里流量计制造复杂，成本比较高。其结构见图 2-9 所示。

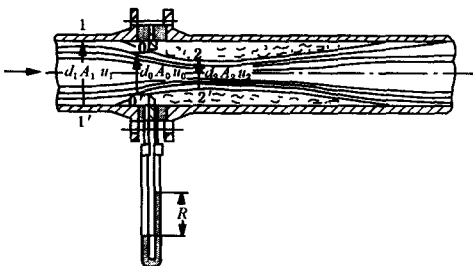


图 2-8 孔板流量计

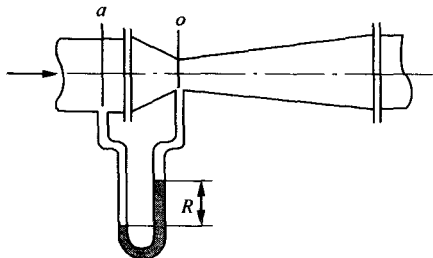


图 2-9 文丘里流量计

孔板流量计和文丘里流量计是利用测量压强差的方法来测量流量的。

$$V = c_0 A_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_A - \rho)}{\rho}} \quad (2-8)$$

式中 V ——体积流量, m^3/h ;

c_0 ——孔流系数或流量系数无因次;

A_0 ——孔口截面积或喉颈处截面积, m^2 ;

ρ_A ——指示液的密度, kg/m^3 ;

ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

R ——U 形管压差计指示液液面的高度差, m 。

2.2.4 转子流量计

转子流量计又称浮子流量计(如图 2-10 所示),由一根呈锥形的玻璃管和转子组成,使用方便,能量损失少,特别适合于小流量的测量,但制造复杂,成本高。转子流量计出厂前经过 20°C 水或 20°C 常压空气状态下进行标定,若被测量的流体状态与转子流量计标定状态不一致时,从转子流量计读出的数据必须按下式进行修正,才能得到测量条件下的实际流量值。

对于液体:

$$\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{\rho_1(\rho_f - \rho_2)}{\rho_2(\rho_f - \rho_1)}} \quad (2-9)$$

式中 ρ_f ——转子材质的密度, kg/m^3 ;

V_1, ρ_1 ——标定时液体的流量与密度, m^3/h 与 kg/m^3 ;

V_2, ρ_2 ——实际工作时液体的流量与密度, m^3/h 与 kg/m^3 。

对于气体,由于转子材质的密度比任何气体的密度大得多,所以

$$\frac{V_{\text{气}2}}{V_{\text{气}1}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{气}1}}{\rho_{\text{气}2}}} \quad (2-10)$$

式中 $V_{\text{气}1}, \rho_{\text{气}1}$ ——标定时气体的流量与密度, m^3/h 与 kg/m^3 ;

$V_{\text{气}2}, \rho_{\text{气}2}$ ——实际工作时气体的流量与密度, m^3/h 与 kg/m^3 。

2.2.5 涡轮流量计

涡轮流量计是速度式流量计,它由涡轮流量变送器(如图 2-11 所示)和显示仪表组成。涡轮流量计的涡轮叶片因受流体的冲击而发生旋转,转速与流体流速成正比。通过磁电传感器将涡轮的转速换成相应的脉冲信号,通过测量脉冲频率,或用适当的装置,将电脉冲信号转换成电压或电流输出。

涡轮流量计的优点:

- ① 测量精度较高,可达 0.5 级以上;
- ② 对被测信号的变化反应快;
- ③ 耐压高,最高可达 50MPa ;
- ④ 体积小及输出信号可远距离传送等。

每台涡轮流量计对应一个固定的仪表常数,仪表常数 K 值为每升流体通过时输出的电脉冲数 ($1/\text{L}$)。它等于脉冲频率 $f(1/\text{s})$ 与体积流量 $V_s(\text{L}/\text{s})$ 之比,即

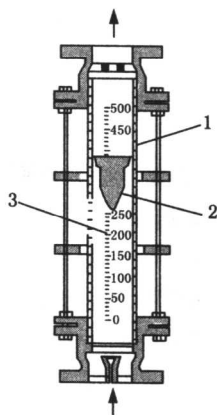


图 2-10 转子流量计

1—锥形玻璃管;
2—转子; 3—刻度

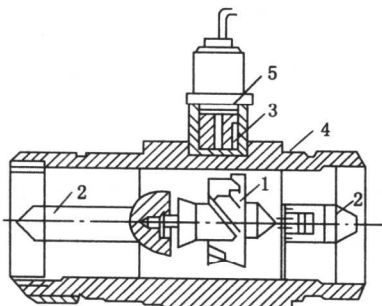


图 2-11 涡轮流量计

1—涡轮; 2—导流器; 3—磁电感应转换器; 4—外壳; 5—前置放大器

$$K = \frac{f}{V_s} \quad (2-11)$$

故

$$V_s = \frac{f}{K} \quad (2-12)$$

为了提高测量精度,防止杂质进入仪表导致转动部分被卡住和磨损,在仪表的上游管线上要安装过滤器。

2.3 温度的测量

温度是表征物体冷热程度的物理量,是实验中的重要参数之一。化工原理实验中流体的物性,如密度、黏度、比热容等,通常是通过测量流体的温度来确定。温度不能直接测量,只能借助于冷热不同物体的热交换以及随冷热程度变化的某些物理特性进行间接测量。

2.3.1 温度测量的方法

按测温原理,温度测量可分为以下几种方式:

(1) 热膨胀

利用物体受热膨胀的性质,通过测定膨胀程度来测量温度。

(2) 电阻变化

测定导体或半导体受热后电阻发生的变化,从而可以得到相应的温度数值。

(3) 热电效应

不同材质的导线连接成闭合回路,两接触点的温度如果不同,回路内就产生热电势,通过测量热电势可测出温度。

(4) 热辐射

物体的热辐射随温度的变化而变化,因此,可以表征物体温度。通常用于测温的仪表分为接触式和非接触式两大类。接触式测温仪表是利用感温元件与被测介质直接接触后,在足够长的时间达到热平衡,两个互为热平衡的物体温度相等,以此来实现对物体温度的测量。非接触式测温仪表是利用热辐射原理,测量仪表的敏感元件,不需与被测物体接触,它常用于测量运动流体和热容量小或温度非常高的场合。

2.3.2 常用测温仪表

实验室常用的测温仪表为接触形式,即玻璃温度计、热电阻温度计、热电偶温度计等,下面分别介绍。

(1) 玻璃液体温度计

玻璃液体温度计是借助于液体受热的膨胀原理制成的温度计。它是化工生产和实验中最常见的一类温度计,如水银温度计、酒精温度计等。这种温度计一般是棒状的,也有内标尺式的,比较简便,价格低廉,在生产和实验中广泛使用。

(2) 热电阻温度计

热电阻温度计由热电阻感温元件和显示仪表组成,是利用导体或半导体的电阻值随温度变化而改变的特性,通过测量其电阻值而得出被测介质的温度。它具有测量精度高、性能稳定、灵敏度高、信息可以远距离传送和记录等特点而被广泛使用。

(3) 热电偶温度计

热电偶温度计是根据热电效应而制成的一种感温元件，它由热电偶和显示仪表及连接导线组成。当两种不同材质的导体或半导体焊接成一个闭合回路时，如两接点温度不同，则在回路上产生热电势，由此特性进行温度测量。

2.3.3 温度仪表的选用

在选用温度计之前，要根据如下情况选择合适的温度计。

- ① 测量的目的、测温的范围及精度要求；
- ② 测量的对象是液体还是固体；是平均温度还是某点的温度(或温度分布)；是固体表面还是颗粒层中的温度；被测介质的物理性质和环境状况等；
- ③ 被测温度是否需要远传、记录。