

液位检测技术

杜如彬 编著
柯象恒



原子能出版社

液 位 检 测 技 术

杜如彬 柯象恒 编著

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书根据作者多年从事液位测量仪表的设计、研制、生产、使用和改进的丰富经验编写而成。书中除概述了液位检测技术的基本知识和仪表的设计程序外,详细介绍了行之有效的七大类液位检测仪表的原理、结构、线路和安装使用经验,并附有仪表校验方法和必要的参考数据。

本书可供广大从事自动化仪表及系统设计、制造、安装、使用的工人和技术人员阅读,也可作为培训教材,还可供大专院校有关专业的师生参考。

液 位 检 测 技 术

杜如彬 柯象恒 编著

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(西便门南大街53号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张12·字数270千字·插1

1987年11月北京第一版·1987年11月北京第一次印刷

印数1—2,800·统一书号:15175·842

定价:2.50元

前 言

在实现工业现代化、自动化的过程中，许多行业迫切地需要解决液位测量和控制的问题。液位测量和控制的好坏，直接影响到生产的安全、产品的产量和质量，以及能源消耗和成本，同时也影响到其它工艺参数的稳定和控制。液位测量，乍看起来似乎很简单，但在很多行业的工艺过程中却是很难解决的问题。尤其在涉及高温、高压、强酸或强碱腐蚀性、强放射性辐照的场合，以及要求远距离传送和在密闭压力容器内使用等情况下，要准确、可靠地测量液位，更是一项困难的任务。

广大从事工业自动化，特别是从事液位检测技术工作的人员，都希望有一本有关液位检测技术方面的系统的参考书，以解决在设计、使用中的问题。可是，由于液位测量方法和仪表的种类繁多，原理各异，又没有统一的标准，使用场合和具体条件又千差万别，要写好一本简单通用的参考书，决非易事。作者根据自己多年从事研制、生产、使用和改进液位测量仪表方面的经验，编写了这本参考书，以供广大读者参考。

本书除介绍液位测量的基础知识和有关基本理论外，着重介绍各类行之有效的检测方法、仪表和使用经验，并对这门技术的发展动向作了概述。其中第一、四、五、六、七章由杜如彬编写；第二、三、八章由柯象恒编写。本书力求深入浅出、通俗易懂，可供从事工业自动化技术工作，特别是液位检测技术工作的工程技术人员、工人以及大专院校有关专业师生参考。

在本书编写过程中，曾得到武汉光明仪表厂许多同志的大力支持，在此深表谢意。

由于这门技术发展很快，我们的水平有限，本书如有不足之处，望读者指正。

著者识

目 录

第一章 概论	1
第一节 液位检测技术的基本概念	1
第二节 液位测量方法及其分类	1
第三节 液位检测技术中的常用术语	3
第四节 液体的物理参数对液位测量的影响	7
第五节 液位测量仪表的设计程序	11
第二章 浮沉式液位测量法	14
第一节 概述	14
一、基本原理	14
二、浮子的种类和主要性能	15
三、测量方法	19
第二节 浮子液位信号器	19
一、浮子液位信号器	19
二、磁浮子干簧液位信号器	19
三、浮子翻板液位信号器	20
四、浮子差动变压器液位信号器	21
第三节 浮秤式液位计	23
第四节 磁浮子液位计	26
第五节 浮子钢带液位计	28
第六节 精密浮子跟踪液位计	28
一、工作原理	28
二、相敏整流及直流放大电路	30
三、加、减脉冲发生器	31
四、步进电机及其控制电路	32
五、可逆记数显示电路	33
六、自动追踪电路	34
七、主要特点	35
第三章 电容式液位测量法	37
第一节 基本原理	37
一、电容式液位传感器	37
(一) 检测导电液体的电容式液位传感器	37
(二) 检测非导电液体的电容液位传感器	38
(三) 检测高粘度非导电液体的电容液位传感器	40
(四) 检测低电导率和有一定漏电液体的电容液位传感器	41

二、测量方法	41
(一) 电桥法	41
(二) 调频法	43
(三) 谐振法	43
(四) 脉冲宽度调制法	43
第二节 电容式液位信号器	44
第三节 电容式液位计	46
一、工作原理	46
(一) 简单的二极管环行电桥	46
(二) 有对地输出端的二极管环行电桥	47
(三) 电路分析	49
二、安装和调整	51
第四章 电阻式液位测量法	54
第一节 基本原理	54
一、电阻液位测量法	54
二、探针液位测量法	54
第二节 液位传感器	56
一、平行双杆、同轴芯棒式液位传感器	56
二、杆式液位传感器	57
三、触点式液位传感器	57
四、低温液位电阻式传感器	58
五、探针式液位传感器	58
六、锥体探头液位传感器	58
七、测量液态金属液位的电阻式传感器	60
第三节 电接点液位信号器	62
第四节 电阻跟踪式液位变送器	64
第五节 锥体尖针复合探针型精密液位计	66
第五章 电感式液位测量法	69
第一节 概述	69
第二节 同轴传输线型液位传感器	70
一、同轴传输线方程式	70
二、同轴传输线的几种数学表达式	71
三、在恒定频率条件下的入端阻抗(长度特性)	73
四、在恒定长度条件下的入端阻抗(频率特性)	74
五、输入阻抗和特性阻抗	75
六、 D/d 的选择方法	76
七、同轴传输线敏感元件的计算公式	77
第三节 涡流感应式液位计	78
一、利用涡流感应测量液位的工作原理	78

二、液位传感器	79
(一) 自感式液位传感器	79
(二) 互感式液位传感器	79
(三) 差动线圈式液位传感器	80
第四节 高频液位计	80
一、工作原理和电子线路	80
二、类比电路的分析	82
三、传感器谐振回路参数的选择	84
四、调频振荡器振荡槽路参数的设计	85
(一) 关系方程式	85
(二) 温度补偿原理	85
第五节 谐振液位变送器	86
第六章 静压式液位测量法	90
第一节 工作原理	90
第二节 电容式差压变送器	91
第三节 吹气式液位变送器	93
一、吹气法测量液位的原理和实现吹气法的条件	93
二、吹气式液位计的结构形式	95
三、吹气量的选择	96
四、旋涡式液位传感器	96
第四节 射流液位信号器	97
一、射流液位信号器的工作原理	97
二、比例元件	98
三、双稳元件	98
第七章 超声波液位测量法	100
第一节 超声波技术测量液位的物理基础	100
第二节 超声波测量液位的方法	102
一、回波测距法	102
二、调频波测距法	103
三、回波时间比较法	103
四、脉冲反射波法	103
五、能量法	103
六、阻尼法	104
七、发射波余振法	104
八、接收波余振法	104
九、超声开关	104
第三节 换能器的选择	104
一、压电陶瓷的性能	105
二、压电陶瓷的 I 、 U 表达式	106

三、换能器的等效电路和导纳圆	109
第四节 液介式探头的设计	110
第五节 夹心式换能器和 $\lambda/4$ 阻抗变换板	115
第六节 弯曲型换能器	117
第七节 发射电路	120
一、可控硅放电脉冲电路	120
二、调幅脉冲振铃电路	121
三、连续波发射电路	122
第八节 接收信号的处理电路	123
一、液位变化时超声波的镜像反射	123
二、理想首波的获得	124
三、箝位电路	126
第九节 声衰减补偿电路	127
一、距离自动增益电路	127
二、幅值自动增益电路	127
第十节 温度补偿电路	128
一、脉宽-脉幅温补电路	129
二、除法器温度补偿电路	131
三、回鸣声速取样温补电路	132
四、半声速振荡器温补电路	133
第十一节 抗扰电路	134
一、时间阈抗干扰电路	134
二、取样保持电路	134
三、数码输出取样保持电路	135
第十二节 超声液位信号器	136
一、基于脉冲反射波的超声液位信号器	136
二、能量法超声液位信号器	139
第十三节 气介式超声波液位计	144
一、指令脉冲发生器	145
二、发射电路	147
三、接收电路	148
四、半声速温控振荡器	149
五、逻辑电路	149
六、控制门电路	150
七、加减控制电路和可逆计数器	151
八、液位传感器	151
第十四节 液介式超声波液位计	152
第十五节 固介式超声波液位计	153
第十六节 跟踪式超声波液位计	156

第八章 γ射线液位测量法	159
第一节 概述	159
一、 γ 射线液位计的组成与特点	159
二、 γ 射线检测液位的基本原理	159
三、如何正确对待辐射	164
第二节 γ射线液位计	165
第三节 γ射线液位计的安装方式	168
附录一 液位测量仪表的校验方法	171
附录二 部分介质的密度表	173
附录三 部分液体的电导率	175
附录四 部分介质的介电常数	175
附录五 国产部分液位计型号规格一览	176
(一) 浮子式液位信号器及液位计型号规格表	176
(二) 电容式液位计和液位控制器型号规格表	177
(三) 电阻式液位信号器型号规格表	178
(四) 电感式液位计型号规格表	179
(五) 超声波液位计和液位信号器型号规格表	179
(六) γ 射线液位计和液位信号器型号规格表	180
(七) 其它形式的液位计型号规格表	180

第一章 概 论

第一节 液位检测技术的基本概念

物位测量包括液位测量和料位测量，液位测量是其中最重要的部分，是一门测量气-液、液-液或液-固分界面位置的测量技术。它包括对测量对象（被测介质及其容器、环境条件）、测量方法和测量仪表的研究。

对被测介质的研究，主要是要了解它的电导率、密度、介电常数、声速、声阻抗、粘度、透光性能、表面张力系数、流动情况以及液体表面的一些特性。还要研究被测对象的工况，如压力、温度、湿度及其变化情况，辐照情况，腐蚀情况，液体容器的几何形状和液体的相对位置及变化规律等。

液位检测包括液位、液位差、相界面的连续测量，定点信号报警、控制，多点测量以及液位巡回检测等方面的技术。

液位检测技术是基于液位敏感元件在液位发生变化时，把相应的能够表示液位变化且易于检测的物理量变化值检测出来。这个物理量可能是电量参数，或机械位移，也可能是诸如声速、能量衰减变化、静压力的变化，等等。再把这些电量的或非电量的物理量变化值采用相应的、最简便可靠的信号处理手段转换成能够用来显示的信号。

当被测液体的液位发生变化时，与之有关的物理参数将要发生一定程度的变化。但是，由于液体的性质及其容器的特性不同，各物理参数的变化程度将有所不同。例如，有的参数变化明显；有的变化不太明显，甚至看不出有什么变化。因此，需要选用最合适的、能够获得最大信号量的物理参数作为液位测量仪表的检测信号，并根据被测液体和测量对象不同采用不同的测量方法。譬如：液位变化时，插入液体中的物体因浸没情况不同会产生浮力变化；插入液体中的单电极（对外壳）、双电极会产生电容量的变化或电阻量的变化；在高频馈电的情况下会产生电感量的变化。因此，在设计、安装、使用液位计时要考虑到：置放在某一高度的超声波探头会发生反射回波声速的变化；浸没于液体中的压力敏感元件会产生静压的变化；贴于容器壁的超声波发、收探头间会发生接收波能量大小的变化；置于侧壁的放射源和接收器间会产生接收能量强弱的变化，等等。同时还要考虑到：被测对象的压力、温度、湿度以及辐照、腐蚀情况；当时的科学技术水平（包括电量和非电量的测量技术、材料情况、工艺水平）、仪表的成本以及用户的经济能力等。究竟选择那种测量方法及其测量仪表合适，要根据具体的情况，权衡各种因素的利弊关系，综合利用它们的有利条件来决定。

第二节 液位测量方法及其分类

根据所选液位敏感元件的不同，可以有很多种液位测量方法（不下二十余种）。主要分为直接液位测量法和间接液位测量法。直接液位测量法是以直观的方法检测液位的变化情况，

虽所用器具结构简单，但方法原始，不能满足工业自动化的要求。因此，间接液位测量法得到了广泛的应用。按照液位敏感元件与被测液体的接触形式又可以分为接触测量和非接触测量两大类，其具体分类情况见图 1-1 所示。

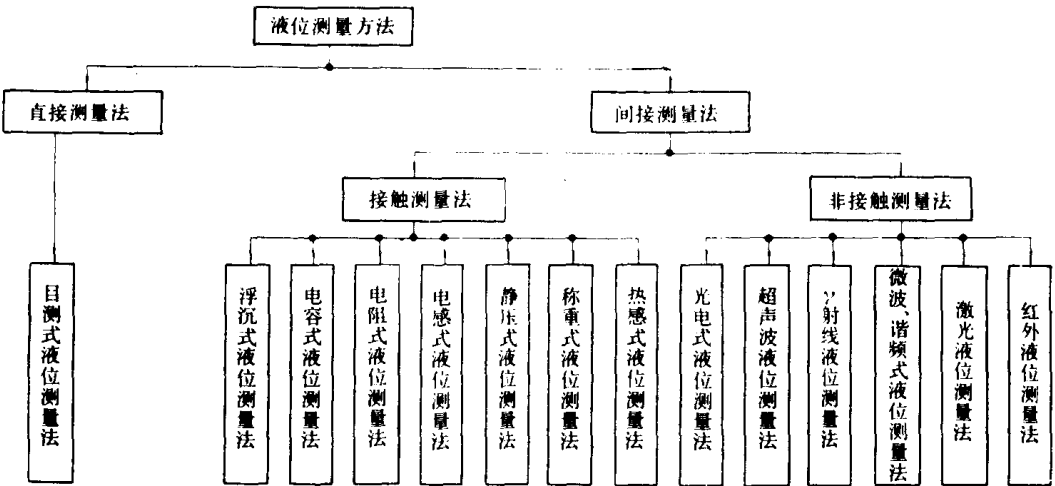


图 1-1 液位测量方法分类系统图

用目测的方法观察液位的变化，例如常见的玻璃管或玻璃板式液位计，以及利用热变色物质制作的变色玻璃管（板）液位计，都属于直接测量法。间接液位测量法是通过测量与液位变化有关的物理参数的变化值来实现液位高度的测量。它能够远传，便于显示和记录，可以实现巡回检测和计算机控制，因而成为工业自动化不可缺少的检测技术。

间接测量法分接触测量和非接触测量两大类。接触测量的特征是仪表的液位敏感元件直接与被测液体接触，其结构有杆式、绳索式、跟踪式、浮沉式、电容式、电阻式、电感式等液位测量仪表。这类仪表的特点是传感器与被测液体接触的测量部件较大较长，或者带有可动部件，容易被液体沾污或粘住，尤其对于杆式结构来说还需要有较大的安装空间，给液位计的安装和检修带来了一定的困难。

非接触测量是借助于超声波、γ射线、微波、激光等新技术发展起来的液位测量技术，尽管尚存在着线路复杂、售价较贵等缺点，但是由于传感器结构简单、安装方便、无可动部件和适用于特殊条件下的液位测量，特别适用于冶金、化工、原子能等工业中带有强酸强碱、强腐蚀、强辐照条件下的液位测量，因而近年来得到了迅速发展。

接触测量和非接触测量液位仪表是液位测量仪表中的两大分支，它们各施所长、相辅相成，分别向通用的和特殊条件下应用的液位仪表两个方面发展。

为了满足国民经济迅速发展的需要，要提供大量的规格齐全、物美价廉的液位测量仪表。首先要求仪表工作可靠，能满足精度要求；结构简单，价格便宜，具有某些特定性能（如防水、防爆、耐高温、耐腐蚀、耐辐照等）；采用二线制，输出标准信号（0~10mA 直流或4~20mA 直流）；提高通用化、系列化、标准化水平，并发展为单元组合式系列仪表。

随着我国工业自动化规模的不断扩大，新的检测对象不断增多，工艺过程控制回路日益复杂。尤其国防、科研事业的迅速发展，要求研制特殊条件下的液位仪表，如脉冲振幅液位、沥青液位、钢水液位、液位差、相界面、高精密度液位以及在低温、高温、高压条件下的液位测量。特殊条件下的液位仪表不仅要求稳定可靠、精确度高，还要求能够进行多点测量、

综合参数（多参数）测量以及微处理机控制。

为了说明工业中的各种液位仪表的使用情况，可用图 1-2 所示的分布圆表示。

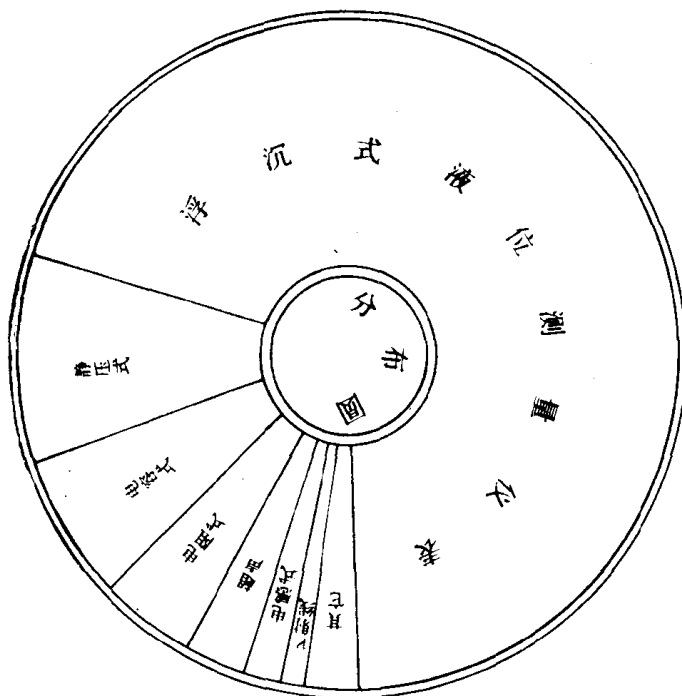


图 1-2 液位测量仪表分布圆

第三节 液位检测技术中的常用术语

为了便于研究和了解液位检测技术，需要先弄清几个常用术语的含义：

一、液位测量仪表

通常把能够连续或断续测量液位变化的仪表称为液位测量仪表。它包括液位计和液位信号器。

二、液位计

能够连续测量液位变化的仪表称为液位计，如电容液位计、超声波液位计等，而不称为“液面计”，因为“液面”二字不能确切表达液体表面位置的高度。

三、液位信号器

能够断续测量液位变化的仪表称为液位信号器，也称液位发讯器、液位控制器。根据信号点的多少可分为单点、双点、三点或多点液位信号器。它具有结构简单、维修方便、成本低廉等特点。信号器通常由液位传感器和信号报警装置组成。当液位达到给定液位时，信号器给出灯光或音响信号，并且一般还有一组触点供控制用。

四、传感器

把被测液体的液位变化按一定规律转变为便于放大和传递的电量或非电量信号的敏感元件及其组装部件，称为液位传感器。也称一次仪表。如电容液位计中的带聚四氟乙烯套管的不锈钢电极及其安装法兰等；浮子液位计中的浮子及其隔离管等；气介式超声波液位计的探头及其波导管等。

液位传感器是液位计的核心部分，传感器性能的好坏直接关系到液位计性能的优劣，所以传感器的研究与设计是液位检测技术中的最主要课题。

五、转换器

转换器的作用是把传感器送来的电量或非电量信号加以放大或处理后，转换成可以用来显示或送给控制机的标准信号，如 $0 \sim 10 \text{ mA}$ 直流； $4 \sim 20 \text{ mA}$ 直流； $1 \sim 5 \text{ V}$ 直流等。

六、变送器

专为工业控制机提供统一的标准信号制作的液位仪表，称作液位变送器。它完成液位传感器和转换器两者的功能作用。变送器与二次仪表的区别在于它不一定备有显示器，主要是提供标准信号送给显示仪表、记录仪表或控制机。

七、测量范围、非测量区、不灵敏区

把可以按规定的精确度进行测量的液位变化范围称为测量范围。又把测量范围的上限值与下限值的代数差称为液位计的量程。

由于受被测液体容器（设备）的安装条件限制而不要求进行测量的长度段，称为非测量区。对于杆式结构的液位仪表来说，通常把最高液位到传感器的安装法兰这一段距离叫做非测量区。

液位的变化不能引起传感器输出信号产生明显变化的一段距离叫不灵敏区，也叫盲区、死区。不灵敏区的产生是由于液位仪表本身性能、传感器的结构、测量方法等因素引起的。如超声波液位计由于发射波余振的存在，使得接收波在接近探头的一段距离（盲区以内）不能分辨出来；电容液位计由于绝缘套管底部封口的存在，在传感器的底部有一小段距离不能进行液位测量，等等。不灵敏区通常小于非测量区。不灵敏区也是衡量液位计性能好坏的重要参数之一。

八、误差和精度

测量误差是标志测量结果可靠程度的参数。

为了考核液位计的质量所进行的测量，即使在同样条件下进行，多次测量结果都不一定相同，但它们皆处于很窄的范围里，形成一个误差带。此带之中线称为额定特性曲线。每次测量结果与真实值之差称为测量误差。

测量误差由于测量条件的不同分为基本误差和附加误差。

基本误差就是在标准状态下，由于液位计本身特性所决定的测量误差。

附加误差是液位计在使用过程中，由于现场条件偏离标准状态所产生的误差。

基本误差和附加误差在产品的鉴定过程中, 按着型式试验的条例逐条测定。

误差由于计算的方法不同可以分为绝对误差、相对误差和量程相对误差。在液位测量中最常用的误差表达方式是绝对误差和量程相对误差。

绝对误差等于液位计的指示值与液位的真实值之差。绝对误差的大小标志着液位计性能的好坏, 绝对误差越小表明指示值越接近真实值, 液位计的性能越好。这个液位真实值可以是实际值 (约定真实值), 也可以是一系列测量结果的算术平均值。在数码显示的液位计和液位信号器中通常以绝对误差表明仪表的精确度。这种以长度量纲的正负偏差表示的误差, 简单明了、直观易读。

对于液位信号器来说, 经常用信号误差和复位误差来衡量其性能好坏。当液位上升高于某一给定值时, 或者液位下降低于某一给定值时, 信号器触发触点信号 (灯光或音响) 进行报警。报警时的实际液位与给定值之差值称为信号误差。反之, 在信号报警以后, 液位下降 (或者上升) 到恢复触点的原来工作状态时的实际液位与给定值之差值叫做复位误差。液位信号器的复位误差往往大于或等于信号误差。

如果液位上升报警液位信号器的信号误差为 $\pm 2 \text{ mm}$, 复位误差为 $\pm 5 \text{ mm}$ 时, 则记为 $U_{+5}^{\pm 2} \text{ mm}$; 反之, 如果液位下降报警液位信号器液位下降时的信号误差为 $\pm 2 \text{ mm}$, 复位误差为 $\pm 5 \text{ mm}$ 时, 则记为 $D_{-2}^{\pm 5} \text{ mm}$ 。其中 U 表示液位上升时报警, D 表示下降时报警。这种非对称偏差的误差表达方式体现了液位信号器中继线路的动作误差的不可逆性。

但是, 绝对误差有时不能说明液位计的精确程度, 譬如: 液位计的绝对误差 $E_{ab} = 10 \text{ mm}$, 当量程 $L_s = 10000 \text{ mm}$ 时, 它显得很小; 而当 $L_s = 100 \text{ mm}$ 时, 它就显得很大了。因此, 为了表明液位计的精确程度引用相对误差 E_{re} 和量程相对误差 E_s 的概念。

相对误差 E_{re} 是液位计的绝对误差与该测量点的液位真实值的比值; 量程相对误差 E_s 是液位计的绝对误差与其量程 L_s 的比值, 这是衡量连续测量液位仪表性能最常用的一种误差表达方式。

用百分数刻度表示的允许最大量程相对误差 $E_{s \max}$ 称为液位计的精度等级, 即

$$K = E_{s \max} \times 100\% = \left| \frac{L_i - L_a}{L_{\max} - L_{\min}} \right|_{\max} \times 100\% \quad (1-1)$$

这就是说, 以量程相对误差百分数形式表示的液位计最大基本误差不能超过仪表精度的等级值。仪表的精度等级共划分为八级, 如表 1-1 所列:

表 1-1 仪表的精度等级

仪 表 精 度 等 级	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5
以百分数表示的允许最大量程相对误差%	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5

液位计中常用的精度等级为 0.5~2.5 级。

误差的分类方法还有很多种, 如按误差产生的原因可分为系统误差和随机误差; 按被测量的变化速度可分为静态误差和动态误差。这些误差分析方法在液位测量中很少采用, 这里不加讨论。

九、回差

回差也称变差，它同仪表的精度一样是衡量液位计性能的重要参数。在测量范围内任一点的回差等于该点的上行与下行的绝对误差之差值。回差数值的大小标明液位计在同样精度的情况下液位计反向测量时指示值接近真实值的能力。液位计中的回差选择范围为其基本误差的0.5~1%。

十、灵敏度

导致液位计的指示值发生明显变化时的液位微小变化量，称为液位计的灵敏度，如式(1-2)所示。

$$S = \frac{dl}{dh} \approx \frac{\Delta l}{\Delta h} \quad (1-2)$$

式中， S ——液位计的灵敏度； Δl ——示值变化量； Δh ——液位变化量。

从式(1-2)可以看出，液位计的灵敏度就是在不考虑干扰的情况下，液位计相对于液位变化量的转移函数，它同精度、回差一样是衡量液位计性能好坏的重要参数。

十一、被测对象和工作条件

被测对象是指被测量的液体及其容器(设备)。

工作条件是指液位计工作时所经受的条件，例如：环境温度、环境压力、电磁场、重力、倾斜、电源变化(电压、频率、谐波)、辐射、冲击、振动等。

液位计的传感器和转换器使用条件不同，因此它们的工作条件也可以有所不同。对于传感器来说，还要考虑被测液体的腐蚀情况、粘度、电导率、防爆要求等因素。

了解和研究被测对象以及液位计的工作条件是研制和选用液位计的先决条件。

十二、技术条件和型式试验

液位计为了满足工程中测量液位的要求，它必须达到的性能指标所规定的条件及其测试方法，称为技术条件。

技术条件规定了基本误差和附加误差的变化范围及其测试条件、测试方法。

基本误差的测试项目包括精度、回差、灵敏度、示值稳定性以及运输环境模拟试验。

附加误差是指在温度、电源、外磁场等外界条件变化时所造成的误差。

在液位计的鉴定过程中，按照技术条件逐条进行的试验，通常称为型式试验。

十三、显示方法

液位测量仪表的显示方式依输出量的方式不同可分为数值量输出显示方式、模拟量输出显示方式和信号报警显示方式，具体的显示方式见图1-3所示。

十四、液位计的评价标准

评价液位计的好坏主要是按性能、结构、成本三项指标。

性能是液位计本身决定的，是衡量液位计的主要指标，系指精度、回差、灵敏度以及各

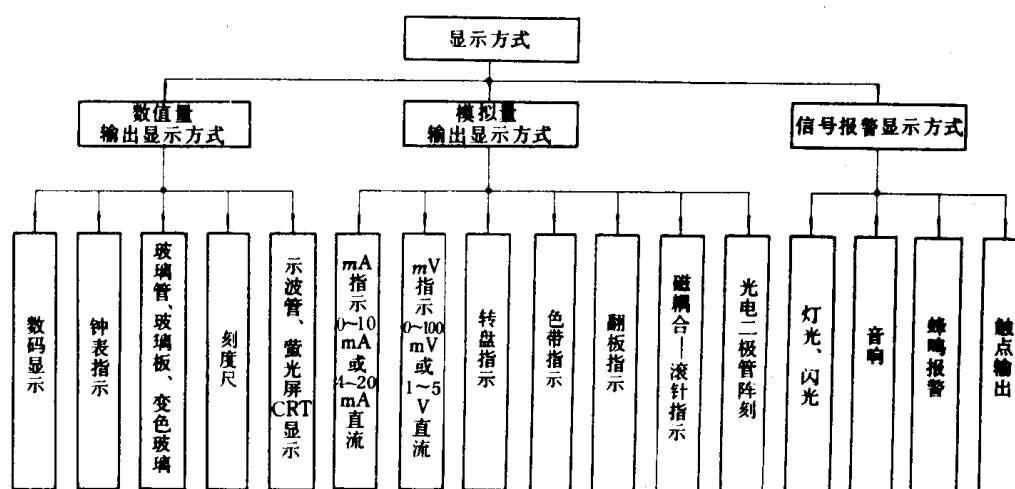


图 1-3 液位测量仪表的显示方式分类系统图

种条件下的附加误差。

液位计的结构要求紧凑合理、美观大方、便于安装和维修，适合于所要求的工作条件下工作。

液位计的成本力求低廉，便于普及。

鉴定和校验液位计时除应了解和准备好该液位计的技术条件和试验方法外，还必须备有校验设备和标准液位计。标准液位计的测量误差必须小于被检液位计测量误差的三分之一。

第四节 液体的物理参数对液位测量的影响

被测液体的物理参数是选择液位测量方法的重要依据，它与液位传感器的输出特性有着密切的关系。其中最主要的物理参数有密度、电导率、介电常数、声速、液体的表面形状以及腐蚀情况等。现以密度、电导率和介电常数为例，说明液体的物理参数对液位测量的影响。

一、液体的密度

液体的密度大小及其在各种环境条件下的变化情况，在浮沉式、静压式、称重式以及超声波液位测量法中起着重要的作用。下面以浮沉式液位测量法为例加以说明。

浮沉式液位测量法的理论基础是阿基米德原理，应用于半浸入液体状态的物体如图 1-4 所示。

图 1-4 中的物体所受浮力根据阿基米德原理，其表达式为

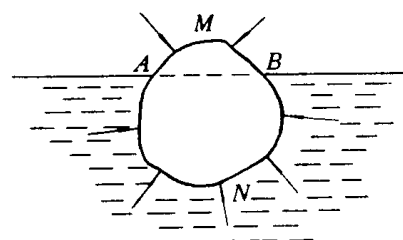


图 1-4 半浸入液体的物体

$$\begin{aligned}
 F &= - \int_{ANB} P n ds - \int_{AMB} P_0 n ds \\
 &= - \int_{ANB} P n ds - \int_{AB} P_0 n ds
 \end{aligned}$$

$$= - \int_{ABNA} P n ds \quad (1-3)$$

式中, P_0 ——大气压力; P ——液体的静压力; ds ——物体的表面元; n ——物体表面外法线单位矢量。

式 (1-3) 表明: 半浸入液体中的物体所受的浮力等于它所排除的液体的重量。因此, 这时浮子 (物体) 所受的合力可表示为

$$\begin{aligned} F &= (V - V_l) \gamma_a + V_l \cdot \gamma_l - V \cdot \gamma_f \\ &= V \cdot \gamma_a - V_l \cdot \gamma_l + V_l \cdot \gamma_l - V \cdot \gamma_f \\ &= V (\gamma_a - \gamma_f) + V_l (\gamma_l - \gamma_a) \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中, V ——浮子的体积; V_l ——浮子浸入液体中的体积; γ_a 、 γ_l 、 γ_f ——分别为空气、液体的密度和浮子的等效密度 (或平均密度)。

当 $\gamma_a \rightarrow 0$ 时, 且 $V_l = \theta V$, 则有

$$F = (\theta \gamma_l - \gamma_f) \cdot V$$

式中 θ ——浮子的体积浸没系数。

浮子在液面处平衡时的必要及充分条件是合力及合力矩等于零, 即

$$F = 0$$

$$\theta \gamma_l = \gamma_f$$

所以采用浮子 (自由状态) 测量液位的必要条件是

$$\gamma_l \geq \frac{\gamma_f}{\theta} \quad (1-5)$$

γ_f 的大小与浮子的形状、结构以及材料的种类、浮子的耐压强度以及浮子位移检测方法等因素有关。 θ 为浮子的体积浸没系数, 一般选 $0.5 \leq \theta < 0.8$ 。对于球形浮子选 θ 为 0.5。

(a) 测量界面时浮子受力情况

当把空气的密度 γ_a 换为轻液体的密度 γ_{li} 时, 式 (1-4) 可写成下列形式:

$$\begin{aligned} F &= V (\gamma_{li} - \gamma_f) + (\gamma_l - \gamma_{li}) \cdot V_l \\ &= V (\gamma_{li} - \gamma_f) + \theta (\gamma_l - \gamma_{li}) \cdot V \\ &= [\theta (\gamma_l - \gamma_{li}) + (\gamma_{li} - \gamma_f)] \cdot V \end{aligned}$$

当 $F = 0$ 时, 则有

$$\begin{aligned} \theta (\gamma_l - \gamma_{li}) &= \gamma_f - \gamma_{li} \\ \theta \cdot \Delta \gamma &= \gamma_f - \gamma_{li} \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta \gamma = \frac{\gamma_f - \gamma_{li}}{\theta}$$

用浮子测界面时, $\gamma_f > \gamma_{li}$, 即 $\gamma_f - \gamma_{li} > 0$, 则其必要的条件应当是

$$\Delta \gamma \geq \frac{\gamma_f - \gamma_{li}}{\theta} > 0 \quad (1-6)$$

从式 (1-6) 中可以看出: 浮子的等效密度必须大于轻液体的密度; 重液体与轻液体的密度差大于浮子的等效密度与轻液体的密度差的 $1/\theta$ 倍。

(b) 受荷浮子的受力情况

浮子的受力通常分为拉力和压力两种情况。受拉力状态时