

测量控制与仪器仪表工程师资格认证

仪器仪表与自动化专题培训

培 训 资 料

测量控制与仪器仪表工程师培训上海培训中心

中国仪器仪表学会过程检测控制仪表分会

2019年12月19日

目 录

第一章 物位测量仪表概述	1
1 定义.....	1
2 物位测量目的.....	1
3 物位测量仪表的分类.....	2
4 常用的物位测量方法.....	2
第二章 常用限位式物位测量仪表（物位开关）	3
1 导言.....	3
2 电容式物位开关.....	4
3 振动阻尼式物位开关.....	6
4 阻旋式物位开关.....	9
第三章 TOF（行程时间法）原理的物位计	9
1 导言.....	9
2 超声物位计.....	10
3 微波物位计.....	14
4 导向微波物位计.....	16
5 TOF 物位计的应用比较.....	23

第一章 物位测量仪表概述

1、定义

两种不同相物体（气态、液态，固态）的相界面位置称为物位。对物位进行测量、报警、控制的仪表称为物位测量仪表。

流程工业中物体的相界面包括以下几种：气体和液体的相界面（通常称为液面）；气体和粉粒状固态物料的相界面（通常称作料面）；两种不相混液体的相界面（例如：油—水界面）；液体和粉粒状固态物料的相界面（例如：水和水中泥沙等沉淀物的界面）等。

物位测量的对象包括液体、粉体（粒径在 $100\mu\text{m}$ 以下的固体）、粒体（粒径约 $100\mu\text{m}—10\text{mm}$ 的固体）、块体（粒径 10mm 以上的固体）以及它们的混合物。对于液体、浆体等流动性好的物体，通常贮存在一定形状的容器如：罐、塔、料仓、地下槽或池中，表面呈水平状。对于粉粒体等流动性差的物体，料面与水平面呈一定安息角。安息角大小取决于堆积物料的表面特性。

2、物位测量目的

- 1)正确测知容器中贮存物料的高度、体积或重量。
- 2)监视与控制容器内的物位，使其保持在工艺过程要求的一定高度或一定高度范围内；或对它们上、下极限位置进行限位报警或控制（防止溢出、排空、定量供料等）。
- 3)根据物位来连续监视及调节容器中流入、流出物料的平衡，以保持最佳生产效率。

物位测量过程是和被测物料密切相关的，不同的测量对象有各自的特点：

液位测量：

- 1)液面在工艺过程中会有波动、沸腾、泡沫、含悬浮颗粒、含气泡、高粘度等各种工况。
- 2)真空、高压、高温、或高温高压同时存在。
- 3)各种腐蚀性介质。
- 4)大型贮罐会出现贮罐内各处的温度、密度不均匀。

料位测量：

- 1)物料在自然堆积时、料面呈一定安息角，安息角随物料颗粒尺寸、比重、表面流动性而异，并且与加料还是排料、加料方式、加（排）料口位置等有关。
- 2)料仓中在进出料时会存在滞留区、架桥及在料仓壁上积料等现象。
- 3)物料在进出料时会与测量元件摩擦或冲击，还会挂料在测量元件上。

界位测量：

在液—液、液—固相界面位置测量时，有时界面会不明显，存在混浊层。

上述情况都会影响测量，各种不同测量原理及不同结构的仪表承受能力是不相同的，在仪表选型时要充分考虑。

3、物位测量仪表的分类

物位检测仪表按测量方式可分为限位测量（物位开关）与连续测量（物位计、物位变送器）两大类。

限位测量：

检测物位是否到达上限、中间值或下限等某个特定位置的测量方式。该类仪表称为限位开关。输出信号的形式通常是二位式通/断（ON/OFF）信号、高低电平。在物位未到达设定点时输出正常信号，在达到设定点时输出报警信号。

连续测量：

测量物位在整个量程范围内的变化，并以模拟（4~20mADC）或数字信号输出，表示相应的物位值。有的物位计还带有数字或模拟的物位显示，通常还带有若干个可在量程范围内任意设定的开关点(ON/OFF)信号输出。

4、常用的物位测量方法

物位检测过程通常是利用某种物理现象对被测物位的影响，通过检测相应的物理量（如电容，传播时间，压力，位移等）来测量物位的。因此测量过程与被测介质的物理特性有关，而被测介质的物理特性是各不相同的，因此每一种测量方法都有一定的适用范围，致使物位检测的方法很多，并在不断的发展中。

本文限于篇幅，不能全面叙述各种物位检测方法，只以表 1 简列，而是重点介绍几种常用的物位开关及近年发展较快的利用回波测距（Time of Flight）原理的超声，微波物位计的原理及应用特点。

表 1：各种物位检测方法的简单原理及特点描述

测量类别	传感元件	测量模式	测量对象	检测参量	
人工检尺	检尺	连续	液体，固体	长度	
直视式	玻璃板（管）	连续	液体	长度	
浮子式	浮子	连续，定点	液体	位移	
浮力式	浮力器	连续，定点	液体	浮力	
磁致伸缩式	浮子	连续	液体	时间	
称重式	测力传感器	连续	固体	重力或应力	
重锤探测	重锤	连续	固体	长度	
射频电容	电极	连续，定点	液体、固体	电容，导纳	
回波测	超声	非接触，声波	连续	液体，固体	时间
	微波	非接触，微波	连续	液体，固体	时间，频率
	激光	非接触，光波	连续	液体，固体	时间

距					
能 量 吸 收	核辐射	非接触, 射线	连续, 定点	液体, 固体	能量
	超声	超声波	定点	液体, 固体	能量
	微波	微波	定点	液体, 固体	能量
	热导	热电阻	定点	液体	电阻
振动阻尼	音叉	定点	液体, 固体	频率	
运动阻尼	旋翼	定点	固体	阻力	

第二章、常用的限位式物位测量仪表（物位开关）

1、导言

用于限位测量的物位仪表通常称为物位开关或定点式物位测量仪表（物位开关或控制器）。用来测量被测物位是否到达预定高度（通常是安装测量探头的位置），并发出相应的限位信号。物位开关由于价廉，使用方便，在过程控制中使用量大。但由于每种工作原理的仪表都有一定的适用范围，故物位开关的种类繁多，选用时必须了解每种物位开关的原理、应用特点才能正确选型。常用的物位开关简单列表 2 如下：

限于篇幅，本章主要介绍应用较多的电容式、振动阻尼式及阻旋式物位开关。

表 2 各种物位开关的简单介绍

测量对象	分类	示意图	与被测介质接触部	使用条件
液体	浮球式		浮球	介质密度为 0.6~2.0
	浮力式		浮力器(平衡浮子)	介质密度为 0.4~1.2
	声导式		探头	非粘滞液体
	热导式		探头	清洁液体
	光导式		探头	清洁液体
液体 或 粉 粒 体	电容式		电极	介电常数恒定
	电导式		电极	导电介质
	振动叉式		振动叉或杆	固态物料粒度 10mm 以下
	微波穿透式		非接触	测量窗为非金属
	核辐射式		非接触	必须经有关部门批准
粉 粒 体	阻旋式		旋叶	介质密度为 0.3g/cm ³ 以上

2、 电容式物位开关

2.1、基本原理

电容式物位开关的工作原理基于物位的变化导致测量探头电容值的变化,利用电子技术测量出电容的变化量,来判断对应物位的电容值是否达到某个设定值,来确定被测物位是否达到高、低报警位置,同时发出相应信号。

目前使用较多的测量方法由测量探头，高频振荡器，带继电器输出的放大器组成一台限位式物位开关，将电容值 C 转化为一个电压值 U ，将 U 与设定的 U_0 比较以输出相应的高低电平或继电器信号。还有一种通过比较器将传感器的电容值转换为相应的频率信号，电容的变化和频率成反比，我们称之为射频倒相技术。通过测量频率变化来发出限位信号。

2.2、电容式物位开关的特点

电容原理是最早应用于物位测量的电测技术，曾经有较大的市场份额，随着其它物位测量技术的发展，其份额在减少，目前以限位开关的应用为主。电容式限位开关具有如下的特点：不受介质密度、导电率变化的影响；不受介质粘附的影响；能耐过程高温、高压、真空、低温、泡沫等恶劣条件；没有盲区，还能用于检测界面。

选型的过程中需要注意介质介电常数、过程温度、压力、介质的腐蚀性、过程连接、安装方式及防爆要求。

电容式限位开关的最高温度可达 400°C 最高压力： 34MPa

2.3、电容式限位开关的结构

电容式限位开关由探头及电子模块组成。

探头经过多年的改进，现在应用较广的主要有两种。

1、带主动屏蔽电极的探头：这种传感器需要将容器的金属仓壁作为电容器的一个电极。在探头的根部上面有主动屏蔽电极，用以抗根部积料，与测量电极之间采用陶瓷或塑料隔离，测量电极可以是裸露的或带绝缘层的金属导体。探头有很多种结构，常用的有棒状、缆式、平板式、管段式等等如图 2.1。



图 2.1 射频导纳开关探头

2、顶端敏感型探头：顶端敏感型电容物位开关是将传感电极完全封装在探头的顶端，用绝缘材料包封，靠近两个电极周围的区域内的介质或介电常数的变化来改变电极间的电容值，由于传感器的敏感区域小，灵敏度高。采用这种结构的电容式开关与根部积料没有关系，只与探头的顶端区域内是否有料相关，结构如图 2.2，可以很好的克服根部积料的问题。



图 2.2 顶端敏感型探头

3、电子模块

原理示意图见图 2.3，目前常用的电容式物位开关都采用了射频导纳技术，射频导纳原理的简单介绍如下：在交流回路中电容的阻抗可以表述为： $R_c = 1/\omega C$ 其中： $\omega = 2\pi f$ f ：为交流电压信号的工作频率； C ：为被测电容；相当于将一个交流电源加载在电容器的两端，在回路中串联一个电流表，流过的电流如下式 $I = V/(1/\omega C) = V\omega C$

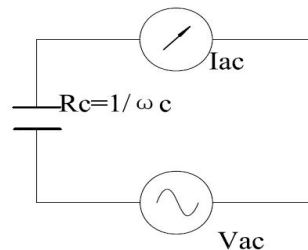


图 2.3 电子模块的原理图

电流 I 正比于回路中的电容，其中 $\omega C = I/V$ 也称之为回路的导纳。如果频率 f 采用射频范围内的频率，这种测量技术就被称为射频导纳技术。

电容物位开关通常采用的工作频率约为 300KHz 。还有一种利用频率变化来测量电

容的技术通常采用 600KHz 作为中心频率。通常这些产品就被称为射频导纳限位开关。

2.4、典型应用

(1) 液位开关（探头全部绝缘），常用的几种用法：液位报警；界面报警，空管检测等可将射频导纳开关顶安装或侧安装

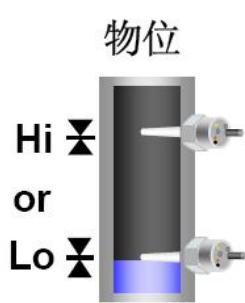


图 2.5 射频导纳用于高低报警

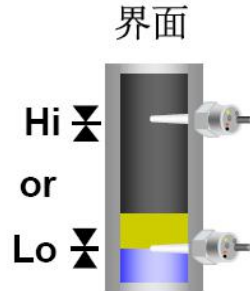


图 2.6 射频导纳用于界面测量

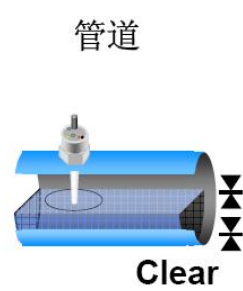


图 2.7 射频导纳用于检测管道是否为空

(2) 电厂原煤仓的高煤位和堵煤检测
电厂的原煤仓需要高煤位检测用于控制煤仓加料皮带上的犁煤器，防止加料的过程中煤的溢出。在输送的过程中分料运输的料斗需要安装防堵煤的料位开关。在目前国内电厂的应用过程中，射频导纳开关被普遍采用。

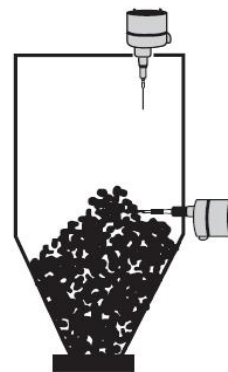


图 2.8 原煤斗的料位开关

(3) 电厂灰斗的高、低位报警。
电厂的灰斗的温度较高，由于安装空间的限制，根部特别容易结料，需要较长的屏蔽段，才能可靠的应用。

典型的用于飞灰检测安装示意图

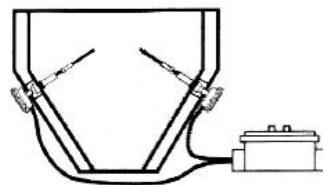


图 2.9 灰斗的料位检测

3、 振动阻尼式物位开关

振动式物位开关利用被测物料对处于共振状态的探头振动的阻尼作用来发出限位信号。由于探头的振动部份大多做成叉状，其工作频率都在音频范围，故通常称其为音叉物位开关，可以用于探测液体或粉状及颗粒状固体介质。具体设计中，也有将检测传感部份做成单杆。实际上也是一个半波长共振体，只是另一半隐藏在振动杆内部。

根据使用对象是液体还是固态介质，仪表结构上有所不同。可以分为液体音叉限位开关及固体音叉限位开关两类。

3.1、液体音叉限位开关

3.1.1 结构

通常由一对长 100mm 的对称音叉及激励其振动的电子模块组成，叉齿的前端呈扁平形，见图 2.10。其根部基座上 1mm 厚的不锈钢膜片，两片压电陶瓷片紧压在上面，由电子模块激励其振动。使整个不锈钢叉体象音叉一样，处于共振状态，叉的前端为波腹，有较大振幅。压电晶体处为波节，共振频率约 400 赫。当被测液体浸没音叉端部时，由于液体对音叉振动的阻尼作用，其共振频率发生偏移，偏移量随液体浸没量增加而增加，约为原振动频率的 20%，即 80 赫。电子模块检测出其频偏，当它达到一定值时发出限位信号。

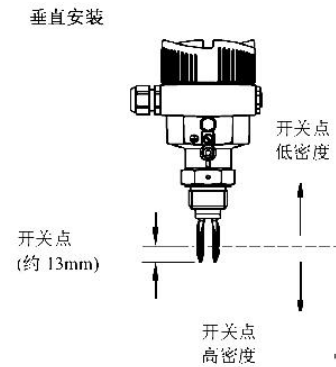


图 2.10 液体音叉外形图

3.1.2、应用：其安装方式通常是侧面安装在检测位置高度，或顶安装、将检测部用杆或电缆延伸到需要发出限位信号的高度，最大长度可达 6m。安装接口通常是 1" 螺纹或法兰。

规格如下：

- (1) 21~250VAC 供电，二线制阻抗输出，直接与外接负载串联；
- (2) 24VDC 供电，PNP 或 NPN 晶体管电平输出，接 PLC；
- (3) 继电器触点输出；
- (4) 两线制 Namur 信号输出。

音叉液位开关通常设有高/低位报警模式选择开关，使其能适用于各种应用要求，并且有延迟量设定开关，可以调整延迟量，以免在汽泡或湍动等工况下产生误动作。并且有 LED 表示开关状态。LED 灯亮时，表示报警态，继电器释放或阻抗最大（开路）。

优点如下：

- 1) 无可动部件，无需维护，无需标定，工作可靠；
- 2) 不受物料物理性能（介电常数、导电率、密度、粘度等）的影响；
- 3) 不受物料是否有汽泡、悬浮粒子及根部粘附物料等影响；
- 4) 安装位置不受限制，尺寸小，安装螺纹为 1"；
- 5) 可以高位或低位任一报警模式工作；
- 6) 高粘度液体也能适用。

7) 材质除常规的不锈钢外，还有 HC 材料，或不锈钢衬 PFA

限制：

1) 工作温度不超过 150℃；

2) 工作压力不超过 4MPa；

由于其上述优点，成为浮球液位开关之外，应用量最大的液位限位开关。

3.2、 固态音叉限位开关

3.2.1、原理与结构：用于测量固态物料的音叉限位开关也是由一个音叉状的探头及一体安装的电子模块组成。所不同的是叉体的尺寸较长，共振频率较低，通常为 80~125Hz，在空气中处于共振状态，当被测的物料（粉末状或颗粒状）与音叉端部接触时，由于物料对音叉振动的阻尼作用，使叉体振动减弱，直至停振，从而实现限位探测。

叉体的根部也是一振动膜片，上面安装有两片压电陶瓷晶体，一片用于激励叉体振动，另一片接收叉体的振动，将其转换为电信号。两片晶体分别接至激励放大器的输出端与输入端。叉体本身是一个机械滤波器，故当激励放大器的增益足够时，系统会在音叉的共振频率上自激振荡。放大器的输出通过压电晶片激励音叉机械谐振，而接收晶片输出的电信号输入放大器，使其维持振荡。当被测物料阻尼探头振动时，由于振动减弱，接收晶片输出信号减弱，导致振荡器不能维持而停振。另一部分线路监测振荡与否来发出限位信号。

3.2.2、 安装

有顶安装及侧安装两种方式，顶安装时用延伸管或延伸电缆来使叉体伸入料仓中需要限位的位置。侧安装时侧面安装在料仓需要限位的高度上。需注意以下几点：

- 1、不允许加料物料直接冲击叉体，如安装时无法避开料流时，可在叉体上加装挡板（见图 2.11）；
- 2、叉齿应处于垂直面内，以免叉体上积料（安装根部有标识）；
- 3、要考虑加料时会有安息角，卸料时料仓内会有积料死区，安装时要避开；
- 4、被测物料最大颗粒度应小于 10mm，最小散料密度为 30g/l。

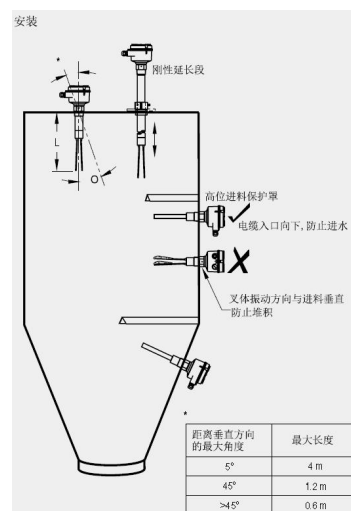


图 2.11 固体音叉的安装示意图

3.2.3、 规格与应用

其规格参数与液体音叉限位开关相似，供电及信号输出都有多种选择。有粉尘防爆型可选。主要应用于各种固态散料。其特点是与被测物料介电常数等电特性无关，可用于电容式物位开关难以检测的低介电常数散料如塑料粒子等的限位检测。

4、阻旋式物位开关

4.1、原理与结构

阻旋式物位开关是利用散状固态物料对旋转叶片的阻尼作用来发出限位信号。图 2.12 为原理结构图，仪表由一个低速转动的电机通过离合器驱动一个旋转叶片组成，侧安装或顶安装方式伸入容器内需要限位的位置上。当被测物料上升，与旋转叶片接触时，对其旋转形成阻力。电机的继续旋转使安装在离合器上的驱动系统产生位移，使微动开关动作，发出限位信号，同时使电机断电。当被测物料下降，不再对叶片旋转形成阻力时，扭力弹簧使驱动系统复位，并使微动开关复位，重新启动电机旋转，恢复正常状态。

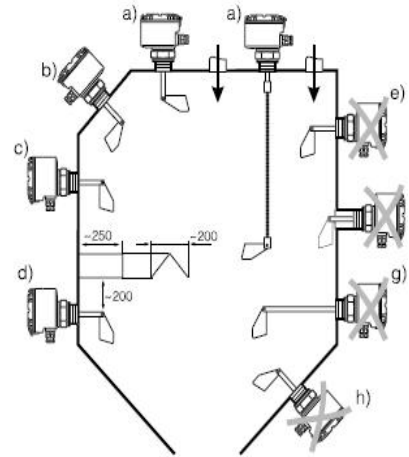


图 2.12 阻旋开关安装示意图

4.2 应用

阻旋式限位开关因其结构简单，使用方便，价廉，广泛应用于固态物料的限位控制。可通过调整弹簧的力或选用大面积叶片或绞合式叶片来增加物料对叶片旋转的阻力，来调整灵敏度，以适用于轻物料。标准型开关的轴杆较短，通常侧向水平安装在需要限位的位置上。在进行低位检测时，应避免加料物流直接落到轴杆上，无法避开时，应在轴杆及叶片上方安装保护挡板，以避免物料流的直接冲击。

顶安装时，为了适应不同的限位高度，连接叶片的杆可以加长，并可以做成可调节型式，以利于现场调整。2m 以上长度需用缆式结构，用挠性钢缆来代替轴杆，便于运输及安装。

缺点是有活动部件，存在磨损等寿命问题，需经常维护。

第三章 TOF 回波测距原理的物位计

1、概述

物位测量技术经历了结构上从机械式仪表向电子式仪表发展，在工作方式上由接触式向非接触式发展。近几年来发展较快的是 TOF（Time of Flight 行程时间或传播时间）测量原理，又称回波测距原理。是非接触测距的一种

方法，产品的推出及应用的发展都非常快。

其工作原理示意图如图 3.1 所示；安装在料仓顶部的探头向仓内发射某种能量波，当能量波传播到被测物料面上时，在物料面上被反射，并且返回到探头上被接收。能量波的来回传播时间就是波传播距离的度量。

$$h = \frac{1}{2} C \times t$$

- 式中：h — 探头到物料面的距离
 C — 能量波在空气中传播速度
 t — 能量波来回传播时间

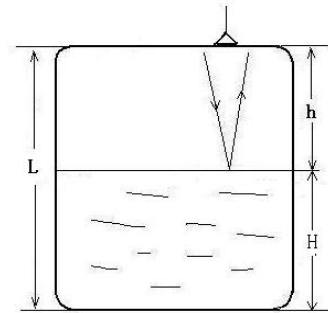


图 3.1 回波测距示意图

如果已知料仓高度 L，就可据之计算出料仓内物位高度

$$H = L - h = L - \frac{1}{2} C t$$

可以利用的能量波有机械波（声或超声波），电磁波（通常为 K 波段或 C 波段的微波），光波（通常为红外波段的激光）。相应的物位计称为：超声波物位计，微波物位计及激光物位计。

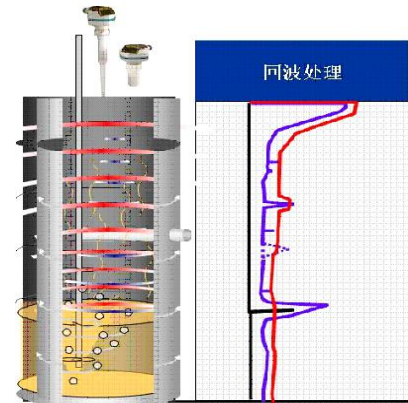


图 3.2 回波曲线

在实际应用场合并不象图 3.1 所示那么理想，料仓中会有人梯，横梁，机械构件甚至搅拌器等，都会反射能量波，空间会有烟雾、蒸汽。如果被测物料是液体，液面有时会波动。如果是固态物料，料面会形成安息角，使波的反射复杂化，除了物料面反射回波外，还会有许多干扰回波存在（图 3.2）。为了正确测量出物位，必须在这众多回波中识别出被测物料面反射的回波，才能据之正确测量出物位。因此必须有回波处理识别功能，由于微电子及数字技术的发展，目前都是首先将回波曲线数字化，然后用数字化方式来处理。各个公司都有自己独特的回波处理方法，来达到在复杂回波中的可靠测量。在采用脉冲方式的超声及微波物位计其回波处理方式是相同的。

下面分述超声、微波、导向微波等物位计的特点及应用。

2、超声物位计

2.1 原理：

超声物位计是 TOF（回波测距）原理中最早进入流程工业市场的，它利用机械

波（超声波或声波）作为能量波来检测物位，大多采用气介导声的方式即利用被测物料上方的气体介质来传导超声波。被测物体可以是液体或固态物料。

超声波在空气中的传播速度 C 与超声波的频率及大气压无关，但随空气温度而变化，可以近似表示如下：

$$C=C_0+0.6T=(331.6+0.6T) \text{ m/s}$$

式中 T —空气温度

C_0 —0℃时的空气中的声速,为 (331.6m/s)

通常是在超声波的换能器中放置热敏元件来检测换能器周围的空气温度，然后根据不同温度下的声波速度来计算距离,才能确保比较高的测量精度。如果在空气以外的气体介质中工作，声波传播速度会不同，必须根据实际的声速来计算距离。

2.2、结构

超声物位计由超声波换能器（探头）及电子组件两部分组成。超声换能器安装在料仓顶部，用来向被测物料发射超声波脉冲，并接收料面的回波，电子组件将回波脉冲放大并进行信号处理，计算物位值，并转换成需要的信号输出。

超声物位计在结构上可以分成两类

1 一体型：超声波换能器与电子组件合为一体，使用时直接安装在被测容器的顶部或被测物料的上方。仪表液晶屏数字显示物位，并输出标准的 4~20mA 模拟信号或数字信号（Hart, Profibus PA 等）。通常采用 24VDC 供电。

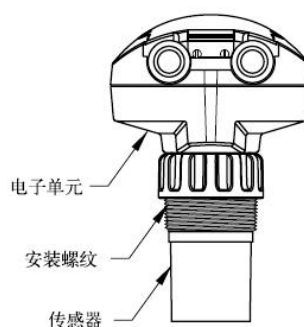


图 3.3 一体式的超声波液位计

2 分体型：超声波的换能器和电子单元相互独立，超声波换能器安装在现场的料仓上，电子单元安装在现场的仪表间内或控制室内，两者之间用高频同轴电缆或屏蔽双绞线连接，距离可达 360 米，由于超声波换能器的耐恶劣环境的能力强，高温可达 150℃，低温-40℃，有全密封的结构可耐腐蚀，可用于防爆场合，测量最大的量程达 100m。

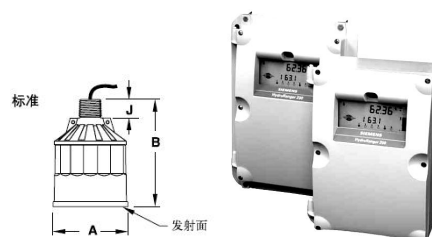


图 3.4 探头

图 3.5 分体型电子单元

2.3、特点

- 1、非接触测量 适用范围广
- 2、安装调试方便
- 3、主要适用于常温常压

2.4、应用领域

虽然微波物位计的发展占领了超声物位计的一部份市场，但在下列领域仍是超声波测量有优势的领域：

1. 常规的短量程（12m 以下）液位测量（常温及常压）

主要是应用一体形的超声液位计，应用领域为：水和废水处理中的液位，化工、石化中的酸碱罐。超声液位计使用方便，仪表尺寸小，性能、精确度都能满足要求，价格也便宜，应用也很成熟，目前仍是主要的选择，应用量较大。

2. 水和废水处理中的液位测量和控制

该领域除了广泛应用一体形超声液位计外，还有一些根据水行业要求设计的分体形超声液位计，它具有专有的一些功能，如：液位差测量，明渠流量测量，先进的泵控制功能，泵送体积积算功能等，量程一般在 15m 以下。在水行业中广泛应用。

3. 固态物料（矿石、煤、谷物等）物位测量

除了细粉料物位外，该领域仍是超声波物位测量有优势的领域，虽然微波物位计也推出了测量固态物位的产品，但是在常用的量程在 15m 以下的应用中，超声波物位计无论是在性能上和价格上都有优势。

2.5、超声波物位计的选型要点

1. 测量距离

选型时首先要考虑的是根据要求的最大测量距离，来选择相应换能器及电子转换单元。量程短的换能器发射的超声功率小，不能测量较长的距离。

由于液面始终是水平的，反射波的信号较强，固态物料表面不平，是利用漫反射，声波的反射信号较弱。故同量程的换能器，在用于测量固态物料时的最大测量距离比测量液面时要相应缩减。通常为 1/2~3/5。西门子公司的 ECHOMAX 换能器，在用于测量固态物料时，不是选用更大量程的换能器，而是在原来量程的换能器上增加泡沫贴面选项。通过改善声阻抗匹配，可在同样电功率激励下，增强声发射功率。可以测量同样量程的固态物位。这样换能器尺寸较小，价格也较低。缺点是耐腐蚀性能稍差，好在固态物料一般都没有较强腐蚀性。

以上只是初步考虑，还有考虑下列两个因素影响。

2. 物料表面的构成及特性

除了液体与固态物料对超声波发射有较大差别外，同类物料表面构成及特性变化，也会对声波反射率产生影响，导致对最大测量距离产生影响，如液体表面如有泡沫或漂浮物存在，或液面波动，会使超声反射信号减小。固态物料如果颗粒较细，或物料较松软，反射信号会减弱。这时尽量选择频率高的换能器可以得到较强的回波。物料流动性差，或易吸潮结块的料面形状会较复杂，也会导致反

射信号减弱。在这些情况下，有效测量距离均要缩减，选型时要考虑。

2.6、工况条件

超声换能器虽不与被测介质接触，但由于安装在料仓（罐）中，所以必须能承受容器内的环境，包括：温度、压力、腐蚀性气氛、爆炸危险。必须选择能满足工况条件的换能器。同时所发射的超声脉冲必须穿越料仓中的气相层，它对声脉冲的影响也必须考虑，具体要考虑以下因素：尘埃、蒸汽、温度、压力、气体成份变化等。

压力：

气体压力对超声波的传播速度几乎没有影响，但不建议超声物位计用于压力超过 0.2Mpa 的工况，因为压力过高时，超声换能器的辐射面上会受到很大压力，此压力会阻碍发射面的振动，降低超声换能器的发射效率。也不建议用于 -0.03Mpa 以下的负压，因为超声波是借助媒介传播的，超声波不能在真空中传播，负压时，空气减少，声传播损耗会增大。

温度

温度的影响有两个方面：

超声换能器本身的耐温能力：普通型换能器耐温可达 90°C ，高温型换能器可高达 150°C ，可根据工况条件选择。

温度对空气中声速的影响为 $0.17\%/^{\circ}\text{C}$ 。虽然在超声换能器中均安置了热敏元件，可测出环境温度进行补偿，但换能器是安装在料仓顶部，当被测物料温度较高时，上下会存在温度梯度，以顶部换能器安装点测到的温度来代表行程的平均温度会带来测量误差，如：上下温差 40°C ，会带来 3.4% 误差。如果在物料处安装另一个温度传感器，将测温信号输入电子单元，和换能器中温度信号取平均值后来计算平均声速，这样计算的物位误差会小很多。

气体成分

通常，超声物位计中是以大气中声速为基准，来进行回波信号处理的。如果声波传播的介质是其它成份的气体或蒸汽，其声速是不同的，会有误差。解决的方法是在编程时输入该气体的声速值来代替空气声速。或在测量范围中某一点，用其它方法实测物位，输入电子单元之中用以计算实际声速，并以此值替代空气中声速。但前提条件都必须是声传播途径上气体成份及温度都必须是均匀一致的并且恒定，否则就会有误差。

防爆场所

用于防爆场所的换能器，必须取得国家有关防爆认证机构的防爆证书。一体型超声物位计有本安型。分体型的换能器，因为输入的电功率大，无法做成本安型，通常是胶封型防爆结构。电缆线需穿金属导管或防爆软管。

3、微波物位计

3.1 概述

利用微波来检测物位是九十年代中期才进入流程工业市场的，最初主要用于液位测量。因为其测量过程类似雷达（RADAR 无线电检测和测距），故俗称雷达物位计，正确的名称应为微波物位计。和超声物位计的差别在于它是用微波（电磁波）来检测物位的。

微波（电磁波）的传播不依赖介质，波速几乎不受环境影响，故测量精度较超声物位计高，一般产品可达 0.1%F.S.，精密级产品可达 1mm 绝对精度。它可以解决许多超声波技术难以胜任的工况。如高温、挥发、蒸汽、高压等。故应用发展很快，已成为物位测量中一种重要手段。

微波在物料表面的反射机理和超声波不同，是在不同的介电常数 ϵ_r 的界面上会产生反射，空气的相对介电常数 $\epsilon_r=1$ ，被测物料的介电常数通常要求大于 1.6， ϵ_r 越大反射信号越强。

利用微波来检测物位的仪表 结构上分为两大类：天线式（非接触式）及导波式（接触式）。通常讲的微波物位计专指天线式，本节也只叙述天线式物位计

3.2 微波物位计技术特点

微波物位计（天线式）是利用微波天线向被测物料发送微波，并接收反射回波，天线和物料不接触。通常仪表是一体型结构，电子组件安装在天线上部的金属腔体内

天线可以有各种类型：绝缘棒、园锥喇叭、平面阵列、抛物面、透镜式、法兰密封面天线等见图 3.6。绝缘棒天线通常用聚四氟乙烯、聚丙烯等高分子材料制成，耐腐蚀性能较好，可用于强酸、碱等腐蚀性介质。但微波发射角较大（约 30° ），并且边瓣较多，对于罐内结构较复杂的工况，干扰回波会较多，有时调试较复杂。



图 3.6 常用天线的类型天线

锥形喇叭天线的发射角与喇叭直径及频率有关（见表3）。在同频率下，喇叭直径越大，发射角越小。抛物面天线发射角最小，约7°，但天线尺寸更大，如果用C波段，直径达Φ454，开孔尺寸要>500mm，安装使用不大方便。发射角小，

表3 锥形喇叭天线尺寸与波束角关系

微波频率	5.8GHz C 波段				26GHz K 波段			
	天线尺寸	Φ 100 4"	Φ 150 6"	Φ 200 8"	Φ 250 10"	Φ 40 1 1/2"	Φ 50 2"	Φ 80 3"
波束角	32°	23°	19°	15°	23°	18°	10°	8°

微波能量集中，可测较远距离（或较低介电常数的物料，也能有较强回波），并且由于波束范围小，可以测量较狭的料仓，

微波物位计按使用微波的波形分类，可分为：调频连续波（FMCW）、脉冲波二类。

早期的微波物位计都采用调频连续波方式，虽然其线路结构较复杂，成本较高，但因为微波的行程时间仅为毫微秒数量级，如直接测时间差，测时精度要达微微秒数量级。在当时技术条件下难以低成本实现，调频连续波方式是测发射波与反射波的频差，易于实现。90年代后期，高精度测时技术已很成熟，故这一阶段推出的微波物位计均采用脉冲法，直接测时，成为微波物位计中主要采用的方式。

3.3、应用

微波物位计比超声物位计更为通用。但是在量程较短，常温常压等的液体测量领域，一体型的超声波液位计，仪表的尺寸小，价格更加低廉。但是在下列领域的应用中，微波物位计有优势。

1、高温、高压、腐蚀、带搅拌等复杂工况。

如沥青、酸碱罐、反应釜；主要在化工、石油化工等行业。



图 3.7 反应罐的现场应用图

2、高炉炉料料位，高温熔融金属液位

这类工况被测物料温度较高，由于热辐射，物位计安装位置温度很高，故通常采用带弯曲延伸管的喇叭天线，或电子部件加以隔热冷却，不锈钢喇叭天线能耐受较高温度。而微波的传播与反射不受温度影响（图 3.8）。典型应用场合有：高炉炉料料位测量、钢水液位测量、熔融铝液位测量等。



图 3.8 高温熔融料位测量

3、粉状、颗粒状料位

测量固态物料的微波物位计，其信号处理软件和测量液位的微波物位计是不同的。粉状料位（电厂灰库、水泥厂均化库及成品库料位）一般采用气动输送，料仓中空间粉尘很大。水泥均化库还从下部往上吹气，料面不是很清晰。超声波测量效果不理想，在吹气进料时由于空间粉尘很大，声波被大量



图 3.9 电厂灰库的料位测量

衰减，收不到回波，而微波很少受影响。Siemens 公司 LR460 微波物位计能很好应用于此类工况。导波式微波物位计也可以用，价格会便宜些，但因为是接触式，安装及维护较麻烦。

4 大型储罐液位精密测量

原油、成品油罐、液化气、化工液体等液位测量，可本安或隔爆。过程级的仪表测量精度可达 3mm，计量级仪表可达 1mm。随着价格下降，微波物位计会逐步成为该领域中主要仪表。

4、 导向微波物位计

4.1 概述

最初，天线式微波物位计发展较快，它是非接触测量的，安装使用均方便。而且故应用广泛，发展很快。

但是，在使用中发现在以下场合天线式微波物位计并不能很好工作：

1. 被测物料介电常数较低时（ $\epsilon_r < 2$ ）
2. 在较狭小的空间内测量
3. 在有很陡的安息角的固态物位测量
4. 高温，高压等工况
5. 有泡沫表面的液位测量。

导向微波物位计虽然是接触式测量，但能应用于上述困难工况，并且价格比天线式微波物位计低较多，故近几年得到较大发展。

4.2 TDR 测量原理及技术要点：

原理

导向微波物位计（或称导波式物位计）虽然其工作方式和天线式相似，但国外文献中大都称其为 TDR（Time Domain Reflectometry）即时域反射原理，以与天线式物位计相区别。

TDR 技术应用于物位测量时，其原理如图（3.10）所示，一根金属导波体自容器顶部伸入，直达底部，覆盖整个物位量程。顶部的外壳中安装电子转换模块及液晶显示屏。被测物料（液体或散状固体）埋住部分导波体，电子模块从顶部发射微波脉冲，在空气中沿导波体外侧向下传播，当传播到介电常数的突变点（物料面）时，根据空气（ $\epsilon_r=1$ ）与被测物料面介电常数（ $\epsilon_r>1$ ）的差别，部分微波能量进入被测物料继续传播，部分微波能量被反射，并沿导波杆返回被接收。反射量的大小取决于两者介电常数的差别，相差越大，反射波越大，由于微波是沿导波杆外侧一个小区域中传播，能量不扩散，只要在该范围内没有障碍物，就不会有干扰回波，故即使被测物料介电常数较低，微波反射能量较少，也能接收到信/噪比好的回波，可靠测量到物位。

导波式微波物位计测量液体时，还能同时测量分层液体的液-液分界面位置，如油-水界面。条件是：上层液体是绝缘介质，介电常数小于 5；下层液体的介电常数要比上层液体介电常数大 5 倍或更多，或下层是导电介质。微波脉冲在第一层液面上部分能量被反射，大部分能量进入液体继续传播，在传播到第二层液体分界面时，部分微波能量被反射回去并穿过第一层液体液面，传播回发射器。这样，当发射一个微波脉冲后，会先后收到两个反射回波。根据这两个回波的不同时间差，可以计算出两层液体的液面位置。需要指出的是微波在液体里传播速度比在空气中慢，与液体介电常数有关，计算时需加以补偿。

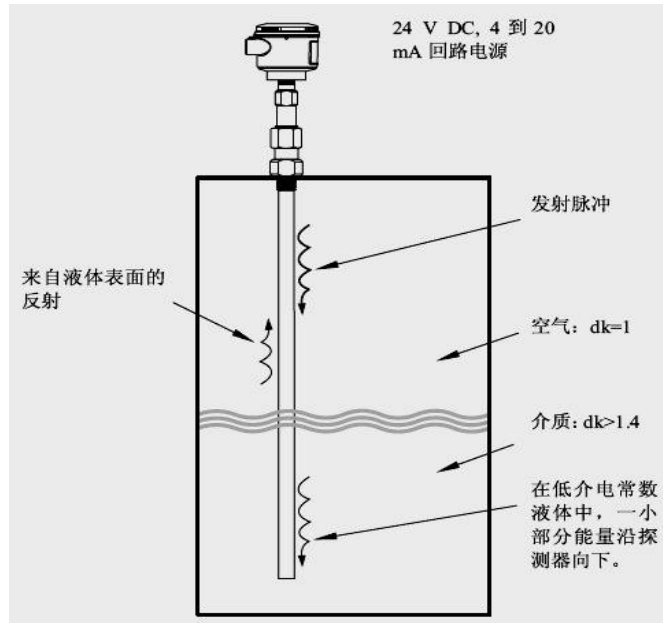


图 3.10 TDR 测量原理

4.2 探头（导波体）的结构种类

导波式与天线式的最大差别是，后者微波是在自由空间传播，而前者是沿导波体传播，所以必须有导波体，我们通常称为探头。其形式上与电容式物位计探头相似，其长度必须覆盖整个测量量程。探头结构形式决定其基本性能，常用的探头有三种形式。同轴式、双杆式、单杆式（图 3.11）。每种都有特定的优点及局限性，因此应用时探头的选型是很重要的。



图 3.11 导向微波物位计探头种类

(1)、同轴式探头

同轴式探头是所有结构中最有效的、并且在所有应用场合中应该首先考虑的形式。其外形及磁场结构如图（图 3.12）所示，由一根金属棒及一根金属圆管同轴安装而成，微波脉冲在棒和圆管内的空间传播，由于微波传播的电磁场完全被封闭在金属外套管和金属棒之间，能量不扩散，也不会受到外界电磁场影响，所以传播效率高，即使对介电常数极低的应用场合，液面反射信号很小，也能较好地传播及被接受，信噪比高，所以可以适用的介电常数下限最低（约 $\epsilon_r \approx 1.4$ ）。但是管内壁挂料或积垢会产生干扰回波，造成测量不可靠，一般应用于清洁液体。由于结构上的限制，其最大量程约为 6m。同轴式探头为了适应不同工况，其探头机械设计是不一样的，选型时要问清工况。同轴式探头可



图 3.12 同轴式探头及其磁场

用于含蒸气的锅炉应用（在外接旁通管中），高温可达 343℃/16.5Mpa。由于有蒸气，微波速度会变化，有专利的算法用于波速补偿。

(2)、双杆式探头

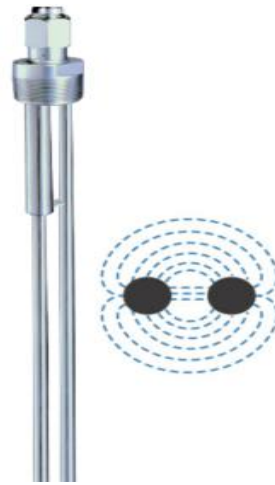
双杆式探头由两根平行的金属杆组成，它的灵敏度不如同轴式探头灵敏度高，这种结构的探头可以测量最低介电常数 $\epsilon_r > 1.9$ 。

探头的外型及电磁场如图（3.13）所示，电磁场不仅在两杆之间形成，还向外扩展，所以如果附近有金属导体靠近，会产生影响。

双杆式探头开放式的结构使在探头上挂料的影响较小，但两杆之间物料搭桥，或在隔离器上结垢会导致测量异常。

也可以用柔性金属缆组成双杆式探头，长度可达 22m，中间用绝缘隔离器固定，以免接触短路。

液体、散状固体料位都可应用。



3.13 双杆式探头及其磁场

图

3) 单杆式探头

单杆式探头是结构最简单的探头，由一根金属杆（或柔性金属缆）构成。其电磁波脉冲在导波杆与安装法兰/螺纹（包括金属顶板）之间形成，脉冲沿导波杆向下传播，它的基准点（或地）在储罐顶部。微波脉冲的发射与传播效率与储罐顶部探头附近有多少金属表面直接相关。

图（3.14）表示单杆式的外形图，还表示出以储罐顶部为地的电磁场的形状，如同泪珠。单杆式的发射及传播效率最低，所以通常对被测介质要求 $\epsilon_r > 10$ 。介电常数过低会导致反射信号弱，不能可靠工作。但对探头上挂料及结垢不敏感。对于挂料的场合，可选用带 PTFE 涂层的探头，既能耐强腐蚀，又能防黏附。使用范围广。



图 3.14 单杆式探头及其磁场

4.3 性能特点及选型要点：

性能特点：

- (1) 低功耗，24VDC，两线制回路供电，4~20mADC/Hart 输出
- (2) 液体，散状固体都能测量，量程可达 22.5m，精度 0.1%FS
- (3) 能同时测量分层液体的液面及液-液界面。
- (4) 探头高温可耐 427℃，低温可耐-195℃
高压可耐 43Mpa，真空也可应用

- (5) 独特的探头结构可应用与特殊工况，如高温高压，蒸汽，液-液界面，满罐测量，卫生场合等
- (6) 比重、介电常数等物理参数变化不会影响测量精度
- (7) 能测量介电常数低达 $\epsilon_r \geq 1.4$ 的物料物位（如丙烷、乙烷）
- (8) 有本安、隔爆、阻燃等多种安全认证。

选型要点

以上宽范围的工况，并不是一种型号的探头能满足的，从前列探头结构中可以看出，每种探头的规格参数是不同的，所以选型时主要是选择探头的型号，必须考虑以下几点：

- (1) 被测物料的介电常数
- (2) 被测物料的量程（探头长度必须覆盖整个量程）
- (3) 过程压力及温度
- (4) 被测过程有否水蒸气等
- (5) 探头接液材质的化学兼容性，是否有积料
- (6) 安装方式：侧装（旁通管），顶装（顶部净空）
- (7) 在固态物料应用时，要考虑探头可能受到的拉力。

4.4 典型应用实例

(1) 塑料粒子料位测量

聚乙烯、聚丙烯等高分子塑料粒子由于介电常数较低，用天线式物位计来测量其物位时反射信号弱，如采用高频（26GHz），大量程（100m 量程）虽也可以测量，但价格高，采用导波式物位计工作更可靠，价格也低很多。对于较小料仓、量程不大的场合，由于塑料粒子轻，对探头磨损及拉力均不严重，是较合理的选型。图 3.17 是应用实例。

介质：聚丙烯塑料粒子

相对介电常数： $\epsilon_r > 2$

量程：20m

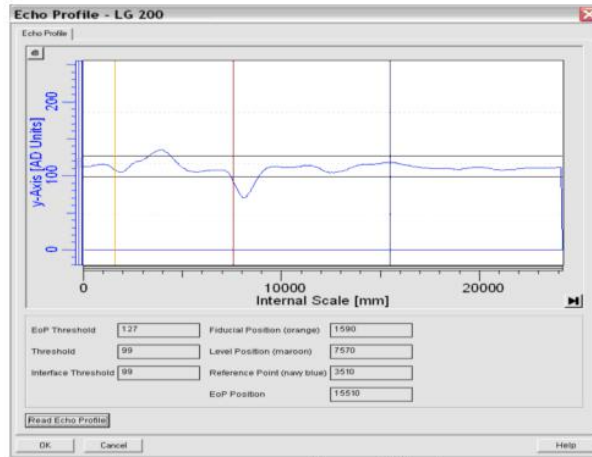
压力：大气压

温度：20℃

探头选型：7ML1302-2（西门子公司产品），柔性双缆式探头，专用于轻质散状固体料位测量



- 聚丙烯塑料粒子
- 相对介电常数 $\epsilon_k > 2$
- 量程：20m
- 压力：大气压
- 温度：常温
- 探头选型：7ML1302-2AA11-1EVA



Siemens Milltronics

图 3.15 双杆缆式应用于塑料粒子料仓

(2) 界面测量

- 同时读出上层液面及液-液分界及位置
- 使用同轴式界面探头，长度 6.1m max
- 回路供电的变送器兼容 HART 通讯
- 输出液面及界面信号
- 要求上层液体 $dK=1.4\sim 5$ ，底层液体 $dk > 15$ 或导电
- 使用于清洁液体及清晰的液-液分界面

图 3.16 是测量示意图。

客户：某化工厂。

工况：苯乙烯/水界面测量，有毒。

温度：常温。

压力：常压。

探头选型：7ML1301-6 同轴式界面探头。

结果：工作稳定，测量精度高。

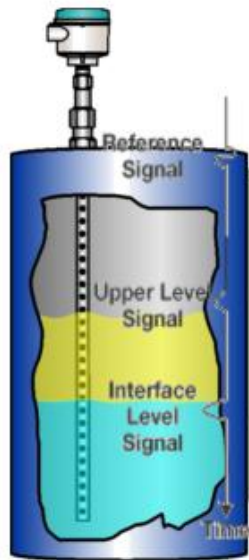


图 3.16 界面测量示意图

(3) 锅炉汽包液位测量

锅炉汽包及高压加热器是同时具有高温、高压及蒸汽的特殊工况。传统用扭力管型电浮筒液位计测量，由于有活动部件，并且需实物标定，维护成本高。导波式液位计无可动部件，不需标定，安装使用方便。特别对于原来用电浮筒液位计的场合，更换时可利用原旁通管，选用同型号法兰，即可将导波式液位计直接安装在原有旁通管上使用，非常方便。图 3.17 是应用示意图。

- 采用西门子公司 7ML1301-5 HT/HP 蒸汽型同轴式探头，量程最大 6.1m
- 在 16.5Mpa 压力下最高可耐温 343℃
- 带蒸汽波速补偿算法，补偿蒸汽介电常数变化的影响
- 是扭力管式电浮筒液位计的升级换代产品

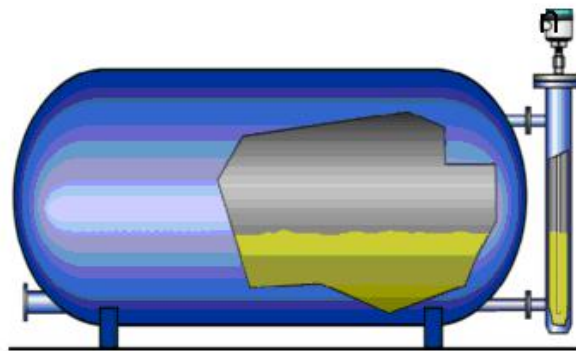


图 3.17 锅炉汽包的测量示意图

5. TOF 物位计的应用比较

表 4 物位仪表的选型注意事项

名称/ 介质特点	液体	固体	温度	压力	腐蚀性	测量范围
超声物位计	主要针对敞口容器, 介质没有挥发。与介电常数无关。	适用于大多数的固体物料, 颗粒, 粉料	最高温度 150℃ 最低温度 -40℃, 取决于换能器	最高压力 0.2Mpa 不能真空或负压低于 -0.03Mpa	材质的耐腐蚀性很好, 适用于一般的酸碱	最大 100m 取决于超声波换能器的型号
微波物位计	液体的介电常数采用 K 波段微波要求大于 1.6, C 波段微波要求大于 3.0	测量固体时适用于绝大多数的测量介质; 块状、粒状、甚至细粉都可测	高温可达 325℃ 最低温度可达 -40℃, 取决于天线部分的材料。	最高耐压 4Mpa, 最低可达真空。取决于天线的结构和过程连接的规格。	不同的天线材料和结构有不同的耐腐蚀性。	测量范围最大可达 100m 取决于雷达产品的型号和被测介质条件。
导向微波物位计	同轴式探头; 液体的介电常数大于 1.4。其他对介电常数的要求取决于探头的结构。	采用缆式结构: 单缆或双缆; 适用于粉尘浓度较高的场合。	高温可耐 427℃, 取决于各种探头结构和材料	高压取决于各种探头结构和材料 最高耐压: 43Mpa	采用衬四氟的单杆式探头, 几乎可以耐各种介质的腐蚀	同轴: 6m 单缆: 35m 双缆: 20m