

# 饮用水浊度测量技术及应用

杨家建 施正纯

(美国HACH公司, 北京, 100004)

**摘要:**作为饮用水水质安全的重要表征参数, 全国供水企业对于出厂水浊度的控制要求越来越高, 不少城市提出了城市供水水质与国际水平接轨的目标, 直至使城市自来水达到直接饮用的目的。浊度小于0.1NTU是保证城市供水微生物学安全的重要手段, 在小于0.1NTU的浊度量级中, 如何实现及保证浊度测量的准确性, 可比对性及可验证性, 是饮用水水质安全至关重要的保障手段。本文阐述了浊度的测量的不同原理及使用范围, 并对上述困扰广大供水工作者的问题进行了详细的描述。

**关键词:**饮用水水质安全; 浊度; 浊度测量; 浊度应用;

## 第一章 序言

浊度作为水质监测中最重要的测量参数已经将近100年了。世界上众多研究机构、公司为浊度的准确度的研究和应用付出了不懈地努力。

低量程浊度仪技术代表了浊度研究中的深刻研究, 通过低量程浊度检测技术建立了浊度测量的理论。包括: 浊度仪的定义, 浊度的线性范围, 高灵敏度浊度仪和光源强度的关系; 什么是准确度和重复性; 如何理解浊度仪的分辨率, 最低浊度水; 特别介绍在线浊度和实验室浊度仪之间的测量数据比较和操作程序等。

随着国家对饮用水水质安全愈发严格的法规建立, 准确的测量低浊度水样的系统技术必需逐渐的改善。为保证饮用水管网末梢浊度满足2006年颁布《生活饮用水卫生标准 GB5749-2006》1NTU以下的要求, 水厂出厂水的浊度应控制在0.5NTU左右。很多城市供水企业将出厂水内控指标控制在0.1NTU以下, 以保证饮用水的微生物学安全, 例如, 上海自来水公司的出厂水浊度目前要求低于0.08NTU。同时, 越来越多的中国供水企业正在向直饮水的目标努力, 随着膜技术的成熟, 出厂水可能达到的浊度甚至低于0.05NTU。

怎样使用现代化的仪器以及精确的浊度测量技术, 保证0.1NTU浊度是准确的可信的, 保证在线及实验室浊度测量的可比对性及可验证性, 是保证饮用水水质监测的正确与否的关键工作, 是摆在我们面前的一个技术挑战。

## 第二章 浊度测量技术

### 2.1 浊度的定义

浊度是一种光学效应, 是光线与溶液中(最常见的是水)的悬浮颗粒相互作用的结果。悬浮固体, 例如泥沙、粘土、藻类、有机物质以及其它的微生物机体, 会对通过水样的光线造成散射现象。这种水溶液由于悬浮颗粒而对光线产生的散射现象就产生了浊度, 它表征出光线透过

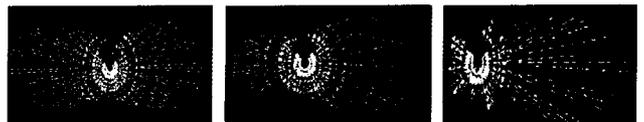
水层时受到阻碍的程度。而光线在水溶液中的散射是一种非常简单的水质的物理参数, 浊度是描述液体里的悬浮固体, 但是, 并不是直接测量它, 浊度测量的是样品的散射光的量, 散射光强度越大, 表征水溶液的浊度越大。

水是由水分子组成, 光线与水分子之间的相互作用, 会产生强度非常低的散射光。由于分子的散射作用, 即使是最理想纯度的水也不会有浊度为零的情况。不含杂质的水的浊度约为0.010NTU或0.012NTU。

浊度值是水样中存在的所有的物质作用的结果。在这种意义上讲, 浊度是一种定性的测量方式。浊度测量在低浊度区间有很好的线性性能, 通过使用标准样品的对比, 和标准化的分析方法, 浊度测量完全可以成为定量分析。

### 2.2 散射光理论

颗粒产生的散射光的方向和强度, 取决于溶液中颗粒的大小、形状、颜色、折射系数以及浓度。传输光线的波长以及悬浮介质的颜色也会影响散射光。



小颗粒

大颗粒

非常大的颗粒

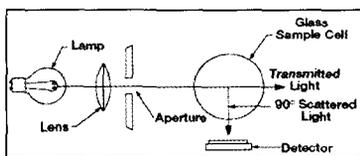
上图水中不同粒径的颗粒对光线的影响的显微照片, 可以看出不同粒径的颗粒对光线的散射是不同的, 而只有与入射光中心线成直角(90度)的散射光强度对于不同粒径的颗粒是相同的, 散射光强度与浊度值之间达到线性相关, 采用测量与入射光成直角角度的散射光强度, 定义这种测量被称之为“浊度测量”, 单位为NTU。

在0-40NTU之间, 散射光与浊度是线性相关的关系。在0.1NTU以下检测到的所有的非线性关系, 主要是由于仪器和/或样品池的不规则所产生的杂散光引起的。

散射光的量取决于光源的波长。这种关系可以用丁道尔公式表示:

$$I = kI_0nV^2 / \lambda^4$$

式中：I—散射光强度， $I_0$ 入射光强度， $\lambda$ 入射光波长， $n$ 指单位体积内的悬浮颗粒数， $V$ 颗粒体积， $k$ 常数。



### 2.3 浊度的影响因素

#### 2.3.1 悬浮颗粒粒径与入射光波长的关系

浊度测量会受下列因素影响：1) 颗粒和/或样品本身的吸光度以及折射率。2) 被测颗粒的尺寸、形状、方向以及吸光性。这些浊度影响取决于通过水样的光线的波长是被吸收还是被散射。下面这些有关干扰的论述适用于绝大多数的水样：

有的水样能够吸收入射光，会阻止很大一部分入射光到达检测系统。会导致低浊度值。

散射光取决于颗粒物的大小以及与颗粒发生相互作用的光线的波长：大的颗粒对波长较长的光线的散射效果比对波长较短的光线的散射效果好。小的颗粒对波长较短的光线的散射效果比大的颗粒对波长较短的光线的散射效果好，对于波长较长的光线，几乎没有什么散射效果。

当颗粒物的物径小于入射光波长的1/10时的散射光效果；

#### (A) 小颗粒



当颗粒物的物径与入射光波长相当时的散射光效果；

#### (B) 大颗粒



当颗粒物的物径大于入射光波长10倍时的散射光效果；

#### (C) 更大的颗粒



### 2.3.2 色度的干扰

如果水溶液有色度，水中的色度会吸收可见光中相对应颜色波长的光，会造成在光线在水中的透射及散射造成衰减，从而导致由于水中悬浮颗粒产生的散射光强度的变化，最终有可能导致浊度测量的误差。

### 2.3.3 测量系统的杂散光

测量系统的杂散光是光学分析仪器不可避免的干扰因素，无法彻底消除，只能尽可能地减少杂散光的干扰。

减少杂散光干扰的有如下方法：

① 简化入射光源到散射光检测器间的结构，最大限

度地降低中间环节的杂散光；

② 检测器内部结构优化设计，减少涉及散射光检测器的杂散光；

③ 按照规程要求，保持光学系统及检测单元的清洁，避免由于灰尘污染造成的杂散光

### 2.3.4 浊度与散射光强度的线性关系

由于浊度在40NTU以内时，散射光强度与浊度是完全线性的关系，从另外一方面说，浊度超过40NTU后，两者的关系并不是一个良好的线性关系。

浊度比率检测系统通过额外的光学检测器，对不同程度的透射光及散射光进行检测，并通过与90度散射检测器的比对计算，以对浊度测量值的修正，并可以对光源不稳定造成的测量波动进行修正。

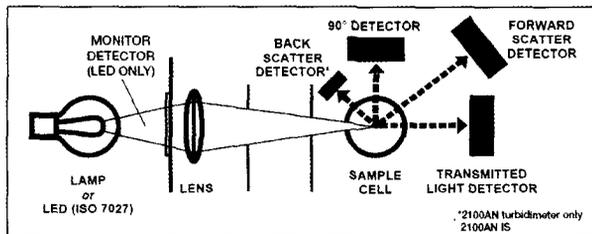


Figure 11. Optical design of Hazch ratio turbidimeter.

比率检测系统包括基本的浊度检测系统，同时还含有其它的检测器来补偿由于色度吸收引起的入射光的损失（图1）。其它的检测器通常是用来测量透射光或前散射光。透射光检测器可以确定光线是否由于色度吸收或灯泡波动发生光线损失。前散射光检测器可以确定光线在发送的方向上是否由于大的颗粒或非球形的颗粒产生过度散射。比率运算法则的定义如下：

$$T_{Ratio} = I_{90} / (a_1 I_{FS} + a_2 I_T)$$

此处：

$I_{90}$  = 浊度散射检测光

$a_1$  = 常数，前散射光（由校准确定）

$I_{FS}$  = 前散射检测光

$a_2$  = 常数，发射光（由校准确定）

$I_T$  = 透射检测光

当光线由于色度或光源光线强度波动的原因，发生光线损失时，透射检测光的强度也会根据基本的散射光信号损失的量而减少。分母的减少导致相应的分子的减小。因此这个数值得到修正。

同理，当光线的损失是由于向前的方向的散射光引起时，前散射光的强度会根据90度检测器中基本散射光信号损失的量而改变。分母的减少会导致分子发生相应的变化。因此这个数值被修正。

因为，前散射光效果通常会发生在浊度大于40NTU的水样中，所以当测量的水样浊度低于1.0NTU时，不需要考虑这方面的干扰。同理，后散射光检测器只能用于浊度值高于1000NTU的水样中。

## 第三章 标准方法概述



测量浊度是要强调使用通用的检测方法，目的就是在使用不同的浊度仪器进行测量时，可以获得一样的测量数据。对于浊度测量，有两种方法是被普遍认可的，USEPA方法180.1和ISO方法7027。

### 3.1 浊度测量的两种国际标准

USEPA 180.1 标准	ISO7027 标准
• 除欧洲外的其它地区	• 欧洲
• 主要的检测器必须是用于浊度（90度）测量的，±30度。	• 主要的检测器必须是用于浊度（90度）测量的，±1.5度。
• 光源为钨灯，色温在2200K到3000K之间。	• 光源的波长必须为860nm。为了获得这个波长，可以使用LED光源或者是将钨灯结合滤光片使用。
• 检测器的光谱响应峰值必须在400~600nm之间。	• 光源的光谱带宽必须为860±30nm。

### 3.2 ISO方法7027

USEPA 180.1 标准	ISO7027 标准
优点:	优点:
• 该方法使用的是短波长的光，这种光对于小颗粒的散射更为灵敏。基于散射光强度与入射光是4次方的关系，钨灯发出的光对于小颗粒的有效散射是860nm的光源的9倍。	• 使用稳定的不可见近单色红外光源，水中可见颜色吸收光波的干扰小
缺点:	缺点:
• 对于在400-600nm波长范围内吸光的颜色干扰非常敏感；为了获得稳定的测量，钨灯光源需要一定的预热时间，而且需要每三个月校准一次	• 对小颗粒的灵敏度较低。虽然减小的灵敏度可以放大，但是这将导致在低浊度时测量噪音增加。在浊度的低量程段，使用这种方法的仪器要比使用USEPA方法180.1的仪器测量浊度值要低一些。在自来水厂，卫生标准要求能够在非常低的浊度情况下做到准确测量。

## 第四章 技术参数概述

为了准确的评估仪器的设计，必需准确理解各种参数。表3描述了所使用的各种仪器的性能参数。

**准确度：**测量值与已知数值之间的差值。HACH公司使用读数的相对误差的百分比形式表示准确度。当低于0.1NTU时，杂散光的误差评估是正常的，在这种浓度下，杂散光的评估成为了测量的准确度。

**线性：**散射光与被测浊度之间的关系。在浊度量程的下限附近，如果杂散光的干扰被最小化，则仪器的线性程度非常高。用统计方法，定义曲线的趋势和准确度之间的线性变化关系，线性程度与准确度相关性很好。

**精度：**使用一台指定仪器测量浊度的重复性。随着样品中浊度的降低，精度也会有所降低。典型的精度表示是：用至少7次重复测量的标准偏差表示。

**分辨率：**仪器准确的测量水样的分辨能力。对于低浊度的分析，仪器的分辨率应该测量到接近0.01NTU，好的仪器可以接近0.0001NTU。分辨率有助于描述水样的特性。例如，最小的有效数字的波动，表示的是有气泡，或大颗粒比正常分布的有干扰。分辨率级的数字变化，表示水样的变化很小，水样的质量非常高，而且几乎没有大颗粒。

**杂散光：**杂散光的定义：不是由于样品散射原因，到达检测器的光线。杂散光的来源包括：样品池不理想以及样品池表面的刮痕，光学系统内部的反射、光学部件的污染或样品池上有灰尘以及电噪声。应该保持仪器清洁，使用完美的、匹配的、无磨损的样品池，把杂散光限制到最小。浊度的干扰的评估，一般是由于光泄漏、玻璃样品池等因子引起的，而不是由于样品本身引起的。在低浊度情况下，为了可以获得关于仪器性能的一个准确的了解，应该进行仪器评估。杂散光不应该超过0.020NTU。如果杂散光的量太大，应该对仪器进行清洗或维护，从而减少这种影响。没有杂散光是不可能的，最好的浊度仪的杂散光的评估大概是0.008NTU。

## 第五章 在线浊度仪的种类

### 5.1 按照光源种类

这种分类方式主要是依照USEPA180.1和ISO7027的标准设计，以钨灯作为光源的可见光浊度仪，以LED发光二极管为光源的红外光浊度仪。

根据上述两种标准的论述，可见光浊度仪适合于低浊度水、色度干扰少的测量应用；而红外光浊度仪适合于高浊度、有色度干扰较大的测量应用。

### 5.2 按照检测方式

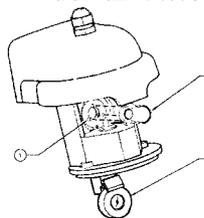
按照浊度仪的检测方式，浊度仪分为探头式浊度仪，和流通池式浊度仪。

**探头式浊度仪，**由于测量和安装方式的原因，可以直接将测量单元用浸入式安装在水池中，或直接安装在管道中，安装适用范围广，测量直接，但由于光检测器直接测量样水，受样水干扰因素影响大。此类浊度仪适用于无压力取样点的，对测量精度

要求不是非常严格的应用。

**流通池式探头**是将样水从监测点取样后，进入分离安装的浊度仪。此类浊度仪，由于有取样系统，安装工作量较大，同时样水在取样管中的沉降变化，也有可能影响浊度测量值的真实性。此类浊度仪适合于不易发生沉降的样水，对测量精度要求严格的应用。

### 5.3 按照检测结构



浸入样水中的检测器，直接测量散射光的强度，无任何中间部件，消除杂散光发生的可能性进入浊度检测器

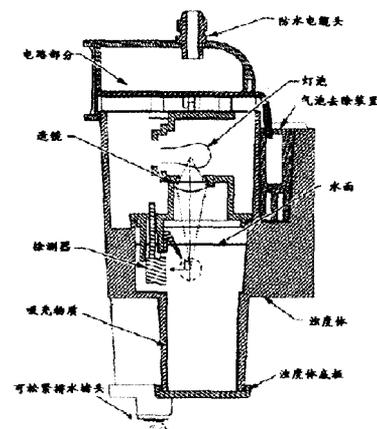


按照检测结构，浊度仪分为光检测器直接测量，和样水瓶式。

光检测器直接测量浊度仪工作时，浊度体顶部的很强的白炽光向下射入浊度体里面的水样中。样品中的悬浮颗粒向四周发射散射光；浸没在水中的光电池检测90度散射光。因为仪器的散射光检测器都是浸没在水样中，无需样品池，所以，大大减少了来自于样品池中的杂散光。

故，无样水瓶的光检测器直接测量浊度仪精确度高，适用于低浊度，超低浊度水的精确测量。

#### 5.4 按照是否有消泡器



在样水进入光学测量单元前，设置样水脱泡器，去除气泡，消除水中气泡对浊度测量的干扰。

水样进入浊度仪主体，并流经脱泡器的折流板系统。水流可以让气泡附着在折流板系统的表面上，或者上升到水面，进入空气中。经过脱泡器以后，水样进入浊度仪主体的样品测量池中。最后，水样通过水堰，溢流到排水口。

水样通过水堰，溢流到排水口。

具有消泡器的浊度仪测量稳定准确，适合在低浊度，超低浊度水的精确测量。

#### 5.5 按照是否具备浊度比率测量技术

具有浊度比率测量技术的浊度仪由于其对比40NTU以上测量值的精确修正功能，保证了对高浊度水浊度测量的精确性，适合于对高浊度水进行测量的浊度仪

### 第六章 总结

浊度仪类型选择	饮用水工艺流程 应用点	
	滤前 (原水, 预处理, 混凝, 沉淀, 滤池反冲洗)	滤后 (滤后水, 深度处理, 出厂水, 管网)
光源种类	红外光	可见光
检测方式	探头式/流通池	流通池
检测结构	无样水瓶光检测器直接测量	无样水瓶光检测器直接测量
消泡器	无需消泡器	消泡器
比率测量技术	比率测量技术	无需比率测量技术

随着《生活饮用水卫生标准 GB5749-2006》的颁布实施，国家对饮用水水质安全的日益重视，中国各供水企业对水质及水质监测能力建设的要求愈发提高，对于作为饮用水水质安全关键参数的浊度的监测，也越来越得到供水企业的重视。如何在饮用水从“源头到龙头”全流程中如何选择合适种类规格的浊度仪，如何在低量程浊度量级中，通过正确的维护、校正及验证，实现及保证浊度测量的准确性，可比性及可验证性，是饮用水水质安全至关重要的保障手段。

作者通联：010- 65150290

## 2年投1.8亿 西区近7万户村民将喝上放心水 珠海市启动新一轮农村水改

1月21日，珠海市新一轮农村水改工程动工仪式在斗门荔山村举行，此次工程共需投入资金1.8亿元，直接受益家庭67000户，预计在明年底完成，届时，珠海市农村将全部用上洁净卫生的自来水。珠海市委常委、常务副市长霍荣荫出席了动工仪式。

水改工作已取得两次阶段性成果

为解决农村饮水困难问题，从2001年6月开始，珠海市启动了农村水改这一民心工程，对西部地区部分村镇的供水设施进行改造。2002年底，斗门121条行政村实现了“村村通”自来水的目标，结束了村民长年饮用山塘水、河水的历史，这是农村水改工作的首次成果。

“村村通”是指供水管网通到每条村口，但村内管网陈旧、老化、材质低劣、安装技术差，造成漏水严重等问题并未得到有效控制，个别村在分摊水损后，水价达到2-3元/吨，比城区高出不少，许多村民用不起。为保障饮水安全，减轻农民负担，2005年9月，第二阶段水改工程“户户通”启动，并于2007年底完成原定计划。改造供水管道近800千米，抄表到户450000余户，管网漏损率从40-50%大幅降低至20%，农村居民与市区居民的水价一致，实现同城同价。

截止2008年底，第二阶段共投入1.91亿元，对88条自然村、6个工业区及部分市政管道进行了建设和改造，供水主干管已基本覆盖整个西部地区。

新形势推动新一轮建设动工

然而，随着近两年工业迅速发展，流动人口日益增多，西部地区的农村城镇化进程加快，大部分村镇原自备水源水质已无法达到国家卫生饮用水标准，许多原来对水改持异议和不理解的村民看到水改带来的好处，都转变了态度，迫切希望能够喝上干净卫生的自来水。珠海市委、市政府对此高度重视，不少人大代表和政协委员也积极倡议，推进新一轮水改工作条件已经成熟，为此，珠海水务集团配合有关部门积极行动起来，并作为实施单位，由市、区政府和珠海水务集团按比例共同出资建设。

此次举行动工仪式的荔山村是被珠海市政府列入首批开工建设的水改项目，位于斗门区乾务镇西部，村内常住人口近9000人，用水户约1900户。村内管网较陈旧，管径因材质低劣、狭窄，并在紧邻用水大户富山工业区影响下，导致部分用户水压过低，不能保证正常供水。据介绍，这里动工的水改工程内容是对村内所有管网进行重新铺设。

据了解，珠海市新一轮农村水改工程总投资达1.8亿元，涉及67个村，其中斗门48个、金湾8个、高新区4个、高栏港区7个，目前水务集团已完成工程项目立项及可行性研究报告等前期工作。

(珠海水务集团 简纯 卢丁聪 供稿)