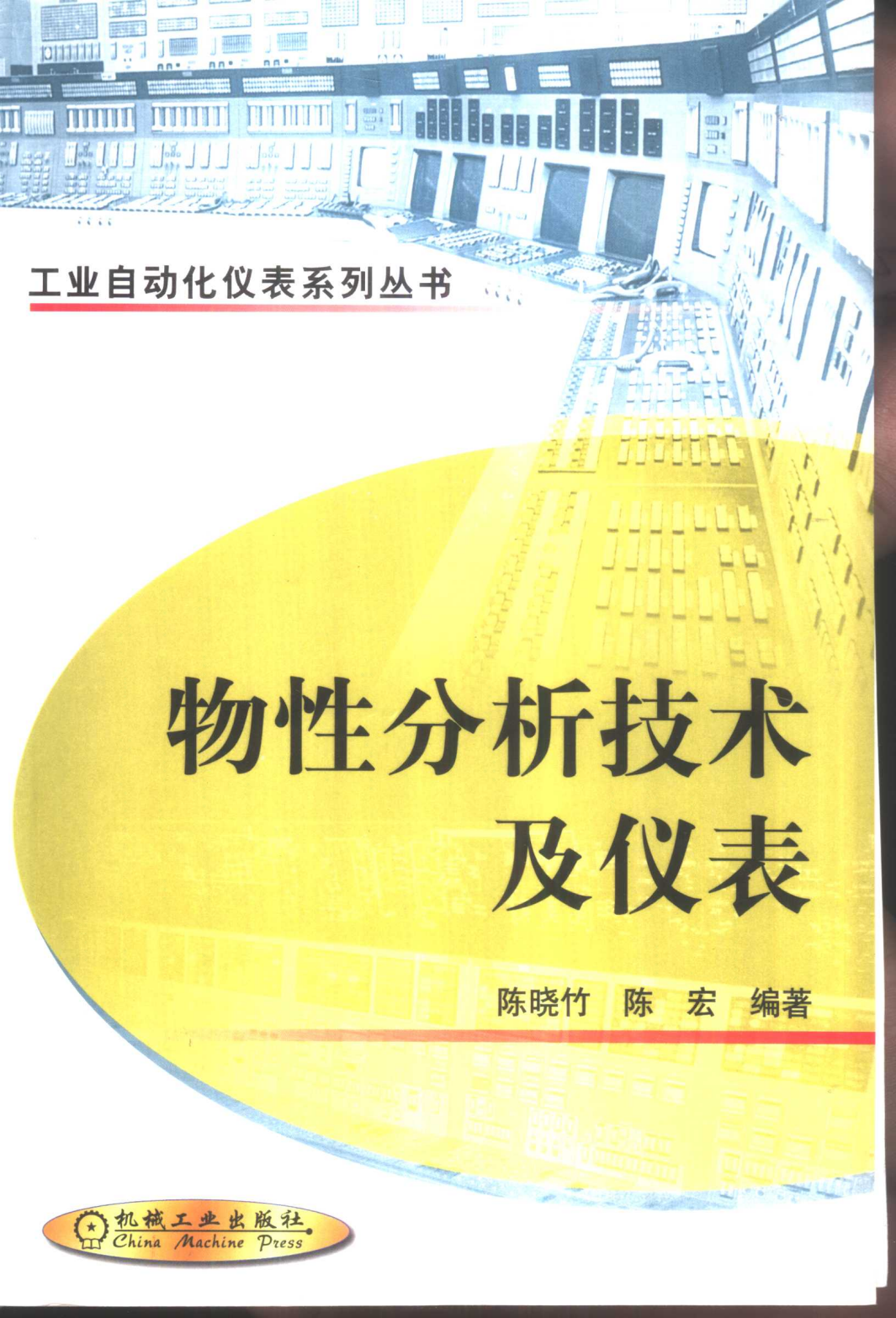




工业自动化仪表系列丛书

物性分析技术 及仪表

陈晓竹 陈 宏 编著



机械工业出版社
China Machine Press

工业自动化仪表系列丛书

物性分析及仪表

陈晓竹 陈宏 编著



机械工业出版社

本书是“工业自动化仪表系列丛书”之一。主要介绍了当代湿度计、水分计、粘度计、密度计、浓度计、酸度计、浊度计等多种物性仪表的工作原理、性能特点及使用方法。全书内容上力求“全、新、精、准”。

本书图文并茂、通俗易懂，是物性分析技术及仪表工作的技术人员不可多得的学习用书。

本书可作为物性分析技术及仪表专业的工程技术人员、大专院校师生的参考书，以及相关专业的技术人员培训用教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

物性分析技术及仪表/陈晓竹, 陈宏编著. —北京:
机械工业出版社, 2002.5
(工业自动化仪表系列丛书)
ISBN 7-111-09923-0

I. 物… II. ①陈…②陈… III. 物理性能—分析
仪器 N. TH83

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 010242 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 周 娟 版式设计: 张世琴 责任校对: 张莉娟
张沪光

封面设计: 姚 毅 责任印制: 何全君
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·10 印张·267 千字

0 001—4000 册

定价: 19.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

编写说明

工业自动化仪表是国民经济各部门重要的现代技术装备之一，广泛用于冶金、电力、石油、化工、轻工、纺织、交通、建筑、食品、医药、农业、环保以及日常生活等各个领域。

工业自动化仪表是对物质世界的信息进行自动测量与控制的基础手段和设备，是信息产业的源头和组成部分。

为了认真总结国内外工业自动化仪表的先进经验，提高我国工业自动化仪表的科技、生产、应用水平，经中国仪器仪表学会、上海工业自动化仪表研究所、机械工业信息研究院和中国仪器仪表学会过程检测控制仪表分会共同研究，决定组织编写、出版“工业自动化仪表系列丛书”。

目前，首先将陆续出版以下 12 种：《温度测量技术及仪表》、《压力测量技术及仪表》、《流量测量技术及仪表》、《物位测量技术及仪表》、《机械量测量技术及仪表》、《物性分析技术及仪表》、《显示调节技术及仪表》、《可编程控制器及其应用》、《过程控制系统和应用》、《执行器》、《仪表可靠性工程和环境适应性技术》、《仪表本安防爆技术》。

本系列丛书内容完整，系列齐全，基本上反映了工业自动化仪表技术与产品的全貌；文字力求深入浅出，通俗易懂。系列丛书既可作为从事工业自动化仪表专业的工程技术人员及广大用户的参考书，也可作为大专院校教材及科研、设计、制造、使用单位工程技术人员培训教材。

编写出版“工业自动化仪表系列丛书”，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

“工业自动化仪表系列丛书”编辑委员会

前 言

《物性分析技术和仪表》是工业自动化仪表系列丛书之一。

物性分析仪表是测量物质某些物理特性的仪表，广泛适用于石油、化工、食品、轻工、环境监测、国防等各个领域，对国民经济的发展和产品质量的提高起着重要的作用。

本书介绍了湿度计、水分计、粘度计、密度计、浓度计、酸度计、浊度计等多种物性仪表的工作原理、性能特点及使用方法，参考了国内外专家学者的专著及论文多篇（详见各章后面的参考文献），在此深表感谢。

书中力求反映国内外物性仪表的研究及使用状况，可作为仪表工作者的参考文献。

本书由工业自动化仪表系列丛书编辑委员会组织编写，全文共分8章，第1~3、7、8章由中国计量学院陈晓竹同志编写，第4~6章由中国计量学院陈宏同志编写，全书由哈尔滨工业大学的陈宏磐、陈守仁教授等审阅。在此向一切为本书的出版付出劳动的专家、学者、教师们表示感谢。

书中涉及的所有符号均在正文中给予说明，因此，未编写常用符号表。

本书在内容上力求“全、新、精、准”，文字上力求精炼通顺，并采用图文并茂的形式，力求明了易懂。

由于我们水平有限，书中难免有缺点错误，望广大读者批评指正。

编者

“工业自动化仪表系列丛书”编辑委员会

主任委员	张继培			
副主任委员	史美纪 (常务)	吴钦炜	王璐璐	
	罗命钧	秦起佑	周娟	张沪光
	张永江			
委 员	薛生虎	杜水友	梁国伟	蔡武昌
	高克成	于世南	陈晓竹	李铁桥
	周有海	吴 哈	彭 瑜	张雪申
	俞金寿	汪克成	缪学勤	刘建侯
	徐建平			

目 录

编写说明

前言

第 1 章 绪论	1
第 2 章 湿度计	4
2.1 概述	4
2.1.1 湿度的概念	4
2.1.2 湿度传感器的发展	8
2.1.3 仪器与应用技术的发展	10
2.1.4 计量标准与测试技术的发展	11
2.1.5 湿度仪表的发展趋势	12
2.2 伸缩式湿度计	13
2.3 蒸发式湿度计	15
2.3.1 湿度的计算	16
2.3.2 玻璃水银湿度计	17
2.3.3 使用电测温元件的干湿球湿度计	21
2.3.4 Gregory 平衡温度干湿计	22
2.3.5 智能式干湿球湿度计	23
2.4 露点式湿度计	23
2.4.1 目视冷凝式露点计	23
2.4.2 光电式露点计	25
2.4.3 绝热膨胀式露点计	26
2.4.4 氯化锂露点计	27
2.4.5 光纤式露点计	30
2.4.6 阻栅式露点计	31
2.5 电子式湿度计	33
2.5.1 电容式湿度计	33

2.5.2 电阻式湿度传感器	38
2.5.3 限界电流型湿度传感器	40
2.5.4 电解式湿度计	41
2.6 电磁波湿度计	43
2.6.1 表面声波湿度计	43
2.6.2 压电晶体振荡式湿度计	47
2.6.3 微波湿度计	49
2.7 光谱吸收式湿度计	51
2.7.1 红外湿度计	51
2.7.2 紫外湿度计	52
2.8 分布式湿度计	52
参考文献	54
第3章 水分计	58
3.1 概述	58
3.1.1 水分的计算	59
3.1.2 水分的测量	60
3.2 重量式水分计	68
3.2.1 烘箱法	68
3.2.2 热天平法	69
3.2.3 干燥剂法	69
3.3 化学反应式水分仪	71
3.3.1 Karl Fischer 法测量原理	71
3.3.2 滴定法	71
3.4 电导式水分计	75
3.4.1 仪器的构造和性能	76
3.4.2 使用注意事项	78
3.4.3 优点和缺点	78
3.5 电容式水分计	78
3.5.1 测量电极	78
3.5.2 测量电路	80
3.5.3 使用注意事项	81
3.5.4 优点	81

3.6 中子式水分计	82
3.6.1 探测式中子水分计	82
3.6.2 表面型中子水分计	83
3.6.3 基于快中子流透射材料,并带有慢中子记录的水分计	84
3.6.4 基于快中子流透射被测材料,并带有快中子记录的水分计	84
3.6.5 智能式中子水分计	84
3.7 红外水分计	85
3.7.1 透射式水分仪	86
3.7.2 反射式水分仪	89
3.7.3 红外水分计的比较	93
3.8 微波式水分计	94
3.8.1 工作原理	94
3.8.2 反射式微波测湿仪	94
3.8.3 透射式微波水分计	95
3.9 核磁共振式水分仪	96
3.10 等温吸附法测水仪	97
参考文献	98
第4章 粘度计	101
4.1 概述	101
4.1.1 粘度的概念	101
4.1.2 溶液的粘度	101
4.1.3 粘度的单位	102
4.1.4 粘度与温度、压力的关系	105
4.2 毛细管式粘度计	108
4.2.1 毛细管法基本原理	108
4.2.2 重力型毛细管法	109
4.2.3 压力型毛细管法	114
4.2.4 工业在线毛细管粘度计	115
4.3 旋转式粘度计	116
4.3.1 测量原理	116

4.3.2 旋转式粘度计结构	118
4.3.3 实验室粘度计	120
4.3.4 工业流程粘度计	122
4.4 落体式粘度计	125
4.4.1 升落球式粘度计	125
4.4.2 滚落球式粘度计	127
4.4.3 陷入式落柱粘度计	129
4.4.4 套筒式落柱粘度计	129
4.4.5 升泡式粘度计	131
4.4.6 工业流程落体法	131
4.5 振动式粘度计	133
4.5.1 扭转振动式粘度计	133
4.5.2 振动片式粘度计	135
4.6 平板式粘度计	136
4.6.1 滑板式粘度计	136
4.6.2 带式粘度计	136
4.6.3 倾斜板式粘度计	137
4.6.4 压板式(横流式)粘度计	137
参考文献	137
第5章 密度计	140
5.1 概述	140
5.1.1 密度的定义	140
5.1.2 密度的单位	141
5.1.3 密度的测量	143
5.2 液体密度测量	146
5.2.1 浮子式液体密度计	146
5.2.2 静压式密度计	153
5.2.3 连续称量式密度计	155
5.2.4 射线式密度计	156
5.2.5 声学式密度计	158
5.2.6 振动式密度计	161
5.2.7 电容式液体密度计	168

5.2.8 用质量流量计测量液体的密度	169
5.3 固体密度测量	170
5.3.1 液体静力天平法	170
5.3.2 杠杆式静力天平法	171
5.3.3 密度瓶法	172
5.3.4 悬浮法	172
5.3.5 密度梯度法	173
5.3.6 电容式固体密度计	174
5.4 气体密度测量	176
5.4.1 浮力法	176
5.4.2 密度瓶法	179
5.4.3 气柱平衡法	180
5.4.4 离心法	181
5.4.5 转矩法	181
5.4.6 流出法	183
5.4.7 气桥式密度计	183
5.4.8 声学式气体密度计	184
参考文献	185
第6章 浓度计	188
6.1 概述	188
6.1.1 浓度的定义	188
6.1.2 浓度的单位	189
6.1.3 浓度的测量	190
6.2 液体浓度计	191
6.2.1 电导式浓度计	191
6.2.2 电磁式浓度计	193
6.2.3 旋光式浓度计	195
6.2.4 折光式浓度计	197
6.2.5 光纤式浓度计	200
6.2.6 超声波式浓度计	204
6.2.7 应变式浓度计	206
6.3 气体浓度计	207

6.3.1 电导式浓度计	207
6.3.2 热导式气体浓度计	208
6.3.3 光纤式浓度计	213
6.3.4 光谱吸收式浓度计	214
6.4 纸浆浓度测量	216
6.4.1 机械式测量方法	216
6.4.2 光学测量方法	218
6.4.3 电容式浓度计	220
参考文献	223
第7章 浊度计	225
7.1 概述	225
7.1.1 浊度的单位	225
7.1.2 浊度测量基础	226
7.1.3 浊度计的分类	229
7.1.4 浊度计的构成	230
7.2 透射式浊度计	234
7.2.1 落流式浊度计	235
7.2.2 双光路双检测器浊度计	235
7.2.3 双光路单检测器浊度计	236
7.3 散射式浊度计	237
7.3.1 测量原理	237
7.3.2 单束浊度计	238
7.4 透射光和散射光比较式浊度计	240
7.4.1 四束比值式浊度计	240
7.4.2 单光源三探测器式浊度计	242
7.4.3 积分球浊度计	242
7.4.4 振动镜式浊度计	243
7.4.5 表面散射光测量式浊度计	244
7.5 8562 型浊度计	245
7.5.1 光学系统	245
7.5.2 水路系统	246
7.5.3 8562 型浊度计检测系统	247

7.6 其他浊度计	248
7.6.1 激光散射式浊度计	248
7.6.2 光纤浊度计	249
参考文献	251
第8章 酸度计	252
8.1 概述	252
8.1.1 pH值的定义	252
8.1.2 pH值的测量	252
8.2 电位式 pH 计	254
8.2.1 电位法测定 pH 计原理	256
8.2.2 pH 计结构	258
8.2.3 pHG 型工业酸度计	270
8.2.4 复合针型 pH 计	273
8.2.5 离子膜 pH 计	275
8.2.6 具有自诊断功能的 pH 计	278
8.3 探头式 pH 计	282
8.3.1 固体 pH 电极概述	282
8.3.2 ISFET pH 计工作原理	283
8.3.3 ISFET pH 计结构	284
8.3.4 ISFET pH 性能特点	285
8.3.5 ISFET pH 电极使用注意事项	286
8.3.6 ISFET pH 电极的应用	287
8.4 光纤 pH 计	287
参考文献	290
附录	293
附录 A Wexler 的饱和水汽压表	293
附录 B (ITS—90)—20~300℃ 纯汞密度表(101325Pa)	301
附录 C 不同温度下 (ITS—90) 酒精水溶液的密度与 乙醇质量分数换算表	303
附录 D 不同温度下 (ITS—90) 酒精水溶液的密度与 乙醇体积分数换算表	306

第 1 章 绪 论

物性分析仪表是指用于测量物质的某些物理特性的技术和仪表。

1. 物性仪表的分类

物性仪表主要包括以下几种仪表：湿度计、水分计、粘度计、密度计、浓度计、酸度计和浊度计等。

湿度计可用于测量气体中的水分含量，目前除了普遍使用的毛发湿度计、干湿球湿度计以外，还有价格昂贵的光谱湿度计、微波湿度计等，同时出现了一大批采用新技术、新材料、新工艺的各类湿敏元件，促进了新型湿度传感器的发展。在国际上，该领域中的研制和应用以美国、日本等发达国家领先，我国在这方面起步晚，但近几年发展很快，在许多方面已接近国际先进水平。

水分计可用于测量固体和液体中的水分含量，经典的方法是加热烘干称重法，精度较高，但测量时间长。进入 20 世纪 70 年代，随着电子技术的发展，又出现了许多新型水分计，其中有代表性的是电导式水分计、电容式水分计、红外式水分计、微波式水分计等，响应速度快，测量时间短，但是水分与电量不是单值函数，一些干扰因素难以克服。到了 90 年代，由于采用了计算机、红外等新技术，又出现了快速烘干失重法，它既保留了经典法测量准确的优点，又解决了测量时间长的缺点，是一种很有发展前途的方法。

粘度计可用于测量液体的粘性系数的大小，常见的测量方法有毛细管法、旋转法、落球法、振动法等，它们常用于牛顿流体、非牛顿流体的粘度测量。近年来，人们更关注特殊条件下（高温、高压）的粘度测量。

密度是一个用于定量地描述物质特性的物理量，每种物质都

有一定的密度值,物质不同密度也不同,而且在一定的状态条件(温度、压力)下一种物质的密度是个常数,它与该物质组成的物系的形状、光泽、质量多少和体积大小无关。浓度同密度一样也是一个用于表征物质特性的物理量。由于它与密度有关而且与密度相比在某些场合更能方便地求得物质成分或性质,所以测量浓度已越来越重要。密度计可用于测量单位体积物质的质量,常用的测量方法有浮计法、射线法、振动法等,近年来,由于计算机的引入,又发展了各种智能式密度计。浓度计可用于测量溶液中溶质的含量,常用的有电导法、电磁法、折光法、旋光法等,还有光谱吸收法、光纤传感法也可以用来测量浓度。

酸度计可用于测量溶液中 H^+ 的含量,常用的是手工试纸测量法和原电池电极法等,半导体探头式固体 pH 计的出现是 pH 测试领域中出现的飞跃。

浊度计可用于测量液体的混浊程度。浊度的测量均以光学方法为基础,主要的是散射式测浊法、透射式测浊法和比浊式测浊法。

对于物质的物理特性的测量,可采用光、机、电等多种测量方法,近年来表面声波传感技术、光纤传感技术等高新技术也应用到物性测量中来,尤其是电子计算机技术的飞速发展,给仪表领域带来了新的生机和活力,许多新型的智能式物性分析仪表应运而生。

物性仪表应用范围很广,既可应用于实验室测量,又可应用于生产流程中在线测量。可在生产过程中直接监测和控制生产工艺和产品质量,因此,在石油、化工、轻工、食品、环境监测等许多部门都有其用武之地。

2. 物性仪表的发展趋势

随着新型材料的开发,相关技术的应用及制造工艺的改善,物性仪表也有了很大的发展,主要表现在以下几个方面:

(1) 固态化 随着半导体技术的发展,半导体在物性仪表中的作用越来越引人注目。它不仅容易接受外界物理信号的作用并

转换为电信号，而且响应速度快、体积小、重量轻，便于实现传感器的集成化和功能化。例如固态 pH 探头的使用，与玻璃 pH 电极相比，具有响应速度快，使用寿命长，可靠性好，使用温度范围宽，安装方便等很多优点。

(2) 多功能、集成化 近年来，我国的镀膜水平及微加工技术发展很快，使物性传感器从单一元件，单一功能向多功能，集成化方向发展。例如，采用新材料制成的湿敏薄膜传感器，体积小、重量轻，可靠性好；把温敏元件、湿敏元件集成到一起的温、湿度传感器，便于湿敏元件的温度修正；而具有粘度修正的密度计和具有温度修正的粘度计，都使测量更加精确。

(3) 图像化 目前，图像技术的发展日新月异，CCD 探测技术已应用在粘度测量中，并将在更多的领域显示出其应用潜力。

(4) 智能化、数字化 随着微机技术的发展，许多物性仪表已实现了智能化。从而使仪表实现自我诊断功能（如具有自我诊断功能的 pH 计）、非线性补偿功能以及量程选择功能（如智能式中子水分计和智能式粘度计）。

(5) 光学化 在物性仪表领域内，目前越来越多地应用微光电子技术，它不仅用于信号的接收、显示，而且用于信号的转换和远距离传输。利用光的固有特性，如振幅、波长、相位、偏振角等参数变化，以及光在传播中的反射、吸收、折射、散射、干涉等现象，已研究开发了多种用途的光学传播器，并在透射式浊度计、反射式浊度计、分布光纤湿度计、红外水分计等仪表中得到广泛应用。

第2章 湿 度 计

2.1 概述

2.1.1 湿度的概念

湿度是指气体中的水汽含量，而水分则是以湿存水、结晶水等形式存在于固体和液体中的水。

湿度的表示方法繁多，但其定义都是基于混合气体的概念引出的。这里所采用的定义和单位以及所用的符号绝大部分源于世界气象组织的规定。

重量法是一种绝对测量方法，而且在当今所有湿度测量方法中它的准确度最高，所以国际上普遍使用该方法作为湿度基准，其量值以混合比表示。因此，混合比可以认为是湿度的最基本的方法，而最经常使用的是直接测量得到的露点温度、干湿球温度和相对湿度等湿度表示方法，根据它们的物理意义可以互相转换。

1. 混合比

湿空气的混合比是湿空气中所含的水汽质量与和它共存的干空气质量的比值，其定义式为

$$r = \frac{m_v}{m_a}$$

式中， m_v 是给定的湿空气样品中的水汽质量 (g)； m_a 是与质量为 m_v 的水汽共存的干空气质量 (g)。

基于混合比定义概念的还有另外三种常见的湿度表示方法：

1) 以干物为基础的质量分数是指水汽的质量和与之共存的干空气的质量之比值，以百分数形式来表示。其表示式为

$$r_p = \frac{m_v}{m_a} \times 100\%$$